



TITLE:

微細加工とその応用に関する研究(  
Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

戸所, 義博

---

CITATION:

戸所, 義博. 微細加工とその応用に関する研究. 京都大学, 1983, 工学博士

ISSUE DATE:

1983-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4954>

RIGHT:



# 微細加工とその応用に関する研究

1982年 11月

戸 所 義 博



## 内 容 梗 概

本研究は電子ビーム露光を中心とした微細加工技術についてまとめたものであり、その内容は、電子ビーム露光技術、プロセス技術、マスク、デバイスへの応用に分かれている。電子ビーム露光技術としては、レジストの電子ビーム露光特性、レジストおよび基板による電子ビームの散乱、近接効果補正について述べる。プロセス技術としては、リフトオフ技術、GaAs 結晶のプラズマエッチング、酸化膜端に起因する増速拡散について記述する。最後に、電子ビーム露光技術の応用として、ホトマスクおよび GaAs FET の製作について述べる。論文は 12 章で構成されている。

第 1 章では微細加工技術の進展について述べ、本研究の目的を明らかにする。

第 2 章、第 3 章ではそれぞれ電子ビーム露光装置、電子ビームレジストについて概説を行う。

第 4 章では電子ビームレジストの露光実験結果を述べる。特に、これらのレジストの感度、解像度とその現像条件への依存性、耐ドライエッチング性を明らかにする。

第 5 章ではジアゾ型ホトレジストの電子ビーム露光特性を述べる。特にポジ形レジストのネガ形への反転と段差基板における露光について詳述する。

第 6 章では電子ビーム露光により形成したレジスト断面形状の基板依存性について、数値計算、露光実験両面より調べた結果を述べる。

第 7 章では近接効果補正について述べる。近接効果と加速電圧、レジスト膜厚、基板との関係を明らかにするとともに近接効果補正量を数値計算により求める。

第 8 章ではリフトオフに適したレジストパターンの形成方法として、電子ビーム露光による方法、LO/HI（低感度レジスト/高感度レジスト）二重レジスト法、HI/LO 二重レジスト法、プラズマエッチングを用いる二重レジスト法について述べる。

第 9 章ではシリコン基板上に形成されたマスクとなる酸化膜端における機械的圧力のために増速拡散が起きることを明らかにする。また、GaAs 結晶のプラズマエッチングについても述べる。

第 10 章では電子ビーム露光とドライエッチングを用いて高精度のサブミクロンマスクを製作できることを明らかにする。

第 11 章では電子ビーム直接露光を用いた GaAs FET の製作およびその特性について述べる。

第 12 章は本研究で得られた結果についてまとめたものである。

## 目 次

第1章 序 論 .....	1
第2章 電子ビーム露光装置 .....	5
2.1 はじめに .....	5
2.2 電子ビーム露光装置の種類 .....	5
2.2.1 電子ビームの形状 .....	5
2.2.2 電子ビームの走査方式 .....	7
2.2.3 試料台の移動方式 .....	8
2.3 電子ビーム露光装置J BX-5A .....	9
2.3.1 電子光学系 .....	10
2.3.2 制 御 部 .....	12
2.3.3 機 械 系 .....	12
2.3.4 直接露光 .....	13
第3章 電子ビームレジスト .....	16
3.1 はじめに .....	16
3.2 電子ビームレジストに要求される特性 .....	17
3.3 電子ビームレジストの種類 .....	18
3.4 ポジ形電子ビームレジスト .....	18
3.4.1 ポジ形電子ビームレジストの原理 .....	18
3.4.2 露光量と分子量の関係 .....	19
3.4.3 溶解速度 .....	19
3.5 ネガ形電子ビームレジスト .....	19
3.5.1 ネガ形電子ビームレジストの原理 .....	19
3.5.2 露光量と分子量の関係 .....	20
第4章 電子ビームレジストの露光実験 .....	23
4.1 はじめに .....	23
4.2 電子ビームレジストの諸特性 .....	23
4.2.1 レジストの塗布 .....	23
4.2.2 感度曲線 .....	24



4.2.3 現 像 .....	25
4.2.4 耐ドライエッチング性 .....	29
4.3 ネガ形レジストの断面形状 .....	30
4.3.1 PGMAの断面形状 .....	30
4.3.2 CMSの断面形状 .....	31
4.4 ま と め .....	34
第5章 ホトレジストの電子ビーム露光実験 .....	35
5.1 はじめに .....	35
5.2 ジアゾレジストの電子ビーム露光特性 .....	35
5.2.1 実 験 .....	35
5.2.2 結果および検討 .....	35
5.3 段差を持つ基板におけるジアゾレジストの電子ビーム露光特性 .....	39
5.3.1 実 験 .....	39
5.3.2 結果および検討 .....	39
5.4 ま と め .....	41
第6章 電子ビーム露光により形成したレジスト断面形状 .....	44
6.1 はじめに .....	44
6.2 数値計算 .....	45
6.2.1 モンテカルロシミュレーション .....	45
6.2.2 レジスト現像のモデル .....	46
6.3 実 験 .....	47
6.3.1 レジストの溶解特性 .....	47
6.3.2 電子ビーム露光 .....	48
6.4 結果および考察 .....	49
6.4.1 吸収エネルギー密度分布 .....	49
6.4.2 レジスト断面形状 .....	49
6.5 ま と め .....	52
第7章 近接効果補正 .....	56
7.1 はじめに .....	56
7.2 近接効果と露光条件 .....	57

7.3	露光強度の計算 .....	58
7.3.1	E I D関数 .....	58
7.3.2	露光強度の計算方法 .....	59
7.4	近接効果補正 .....	60
7.5	ま と め .....	63
第8章	リフトオフ技術 .....	66
8.1	はじめに .....	66
8.2	電子ビーム露光による方法 .....	67
8.2.1	シミュレーション .....	67
8.2.2	実 験 .....	69
8.2.3	ま と め .....	70
8.3	二重レジスト技術 .....	70
8.3.1	レジストの溶解特性 .....	71
8.3.2	シミュレーション .....	73
8.3.3	実 験 .....	75
8.3.4	ま と め .....	77
8.4	プラズマエッチングを用いた二重レジスト技術 .....	78
8.4.1	方 法 .....	78
8.4.2	レジストのエッチレート .....	79
8.4.3	リフトオフ用レジストパターンの形成 .....	80
8.4.4	ま と め .....	82
第9章	プロセス技術 .....	85
9.1	GaAs 結晶のプラズマエッチング .....	85
9.1.1	はじめに .....	85
9.1.2	エッチング速度 .....	85
9.1.3	エッチングの異方性 .....	86
9.1.4	選択エッチング .....	86
9.1.5	ま と め .....	87
9.2	増速拡散 .....	88
9.2.1	はじめに .....	88
9.2.2	実 験 .....	89

9.2.3 結 果 .....	89
9.2.4 考 察 .....	91
9.2.5 ま と め .....	93
第10章 サブミクロンマスクの製作 .....	97
10.1 はじめに .....	97
10.2 2段階電子ビーム露光法 .....	97
10.3 ドライエッチング .....	99
10.4 サブミクロンマスクの製作結果 .....	101
10.5 ま と め .....	102
第11章 デバイス製作への応用 .....	104
11.1 はじめに .....	104
11.2 GaAs FETの構造と動作原理 .....	104
11.3 GaAs FETの製作 .....	105
11.3.1 製作工程 .....	105
11.3.2 重ね合せ精度およびパターン精度 .....	105
11.3.3 リフトオフ .....	106
11.4 GaAs FETの特性 .....	107
11.5 ま と め .....	108
第12章 結 論 .....	112
著 者 発 表 文 献 .....	114
謝 辞 .....	117

## 第1章 序 論

半導体素子、半導体集積回路の高性能化、高集積化にともない、素子の微細化が進められ、微細加工技術が非常に重要となっている。

微細加工技術は大きく分けると、レジストにパターンを形成するリソグラフィ技術と半導体素子そのものを加工するプロセス技術からなる。

図1.1に微細パターンを形成するために用いられる主なリソグラフィ技術を示す。パターンデータからマスクを製作する方法としては、紫外光を用いるパターンゼネレータによる方法と電子ビーム露光を用いる方法がある。電子ビーム露光を用いることにより、パターンの微細化、描画時間の短縮、製作コストの低減を図ることができる。

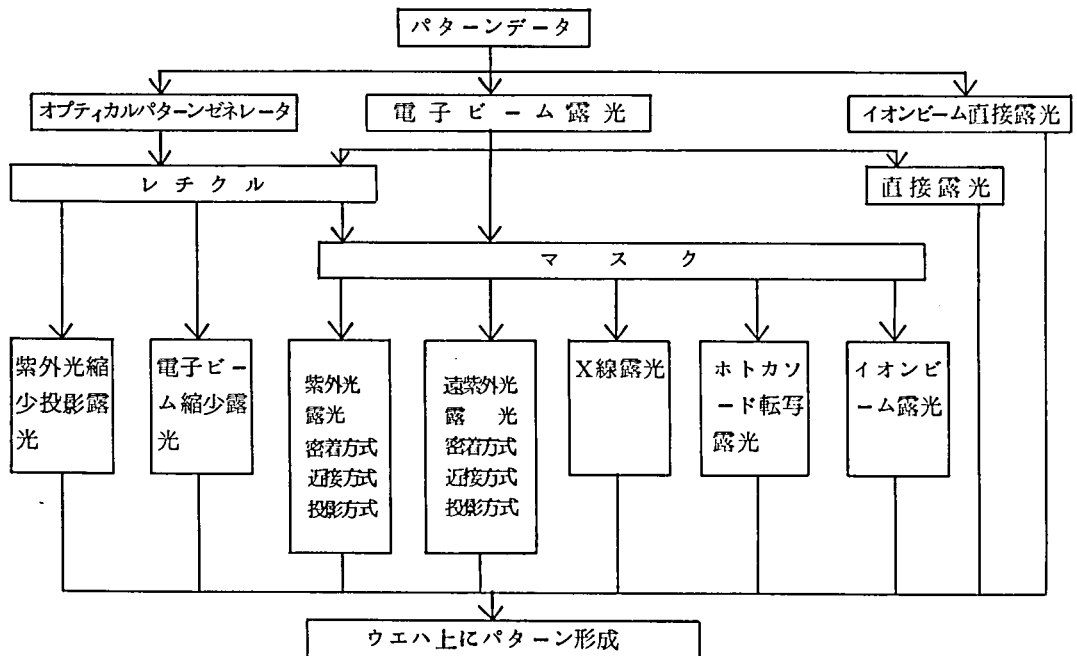


図1.1 微細パターン形成のためのリソグラフィの分類

ウエハ上にパターンを形成する方法としては、電子ビーム、イオンビームなどの直接露光法とマスクにより転写する方法がある。

紫外光投影露光<sup>1)</sup>、紫外光縮少投影露光<sup>2)</sup>、遠紫外光投影露光<sup>3)</sup>などの光を用いる方式では、 $1\mu\text{m}$ 以下の微細パターンを形成することは難しい。マスク転写方式で $1\mu\text{m}$ 以下の微細パターンを形成するために、X線露光<sup>4)</sup>、イオンビーム露光<sup>5)</sup>、電子ビーム転写<sup>6)</sup>などの研究が進められている。X線露光、イオ

電子ビーム露光は、電子ビーム露光に比べて基板による散乱がほとんどないので、微細化に有利である反面、マスクの製作が難しい、パターンを重ね合せが難しいなどの短所がある。現在のところ、微細パターンを形成するリソグラフィ技術としては、電子ビーム露光技術が最も進んでいる。

マスク製作、直接露光を含めた電子ビーム露光技術の特長は次のとおりである。

- (1) パターンの微細化により、半導体素子の経済性、高性能化に寄与する。
- (2) CAD による設計のパターンデータから短時間にマスクが製作でき、また直接露光方式においてはウエハ上に直接パターンを描画するので、製品開発期間の短縮を図ることができる。
- (3) 多品種少量生産、設計変更への対処が容易である。
- (4) マスク製造工程の短縮によるマスク欠陥の低減あるいは直接露光による欠陥の低減により歩どまりの向上が期待できる。
- (5) マスク製作においては、光学パターンジェネレータに比較して、パターン数が多い場合には、描画時間短縮の効果が顕著であり、経済的である。

一方、プロセス技術は、図 1.2 に示すように次の三つに分類することができる。

- (1) レジストパターンを基板に転写する技術。
- (2) 不純物ドーピング技術。
- (3) 膜形成技術。

#### プロセス技術

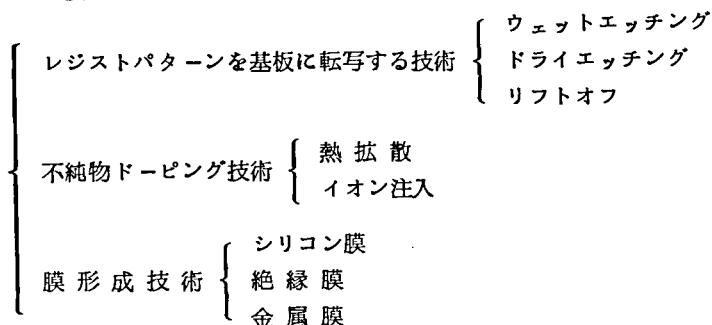


図 1.2 プロセス技術の分類

エッチング、リフトオフなどのレジストパターンを基板に転写する技術、イオン注入、拡散などの不純物ドーピング技術は、リソグラフィ技術とともに、半導体素子の水平構造の加工精度を制限している。これに対して垂直構造の加工精度を規定しているのが、不純物ドーピング技術およびCVD、蒸着などを用いたシリコン膜、絶縁膜、金属膜の膜形成技術である。

リソグラフィ技術とくに微細パターン形成法として最も開発の進んでいる電子ビーム露光技術は、素子寸法の微細化に決定的な影響を及ぼす重要な技術であるが、それとともに、ドライエッチング、リフトオフ、拡散などの個々のプロセス技術もリソグラフィ技術の微細化に応じて技術革新をしていく必要がある。

本研究は電子ビーム露光を中心とした微細加工技術についてまとめたものである。以下に本研究の目的を要約する。

- (1) 電子ビーム露光による微細レジストパターンの形成方法を数値計算、露光実験両面より調べる。
- (2) プロセス技術として、リフトオフ、酸化膜端に起因する増速拡散について調べる。
- (3) 電子ビーム露光を用いてマスク、素子を製作する。



参 考 文 献

- (1) F.H. Dill, A.R. Neureuther, J.A. Tuttle, and E.J. Walker, "Modeling projection printing of positive photoresists," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-22, no.7, pp.456-464, July 1975.
- (2) オーブリ・C・トービー, "ステップ・アンド・リピート方式による縮少投影型露光装置の将来," Nikkei Electronics, 1980. 2. 4, pp. 149 - 160.
- (3) 岩松誠一, 朝波健一, "遠紫外線露光装置の開発," 半導体集積回路第 17 回シンポジウム講演論文集, pp. 78-83, Nov. 1979.
- (4) J.S. Greeneich, "X-Ray lithograph: Part I - design criteria for optimizing resist energy absorption; part II - pattern replication with polymer masks," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-22, no.7, pp.434-439, July 1975.
- (5) ロバート・L・セリガー, ポール・A・サリバン, "イオンビーム露光技術の基礎実験とその結果," Nikkei Electronics, 1980.7.21, pp. 203-215.
- (6) T.W. O'Keefe, J. Vine, and R.M. Handy, "An electron imaging system for the fabrication of integrated circuits," in Solid State Electronics, vol.12, New York; Pergamon Press, 1969, pp.841-848.

## 第2章 電子ビーム露光装置

### 2.1 はじめに

電子ビーム露光を用いた微細加工技術の基礎となるのは、電子ビーム露光装置と電子ビームレジストである。電子ビームレジストについては第3章で述べることにし、本章では電子ビーム露光装置について概説する。

電子ビームを用いて微細パターンを形成する研究は、1960年代後半に開始された。その初期には、走査型電子顕微鏡 (SEM) の技術を基礎としており、細かく絞った電子ビームを走査しながら材料上に照射する方法が用いられた<sup>1)</sup>。1975年ごろまでが、電子ビーム露光装置の揺籃期であり、勢力的に研究開発が続けられた<sup>2)~6)</sup>。この時期に開発された電子ビーム露光装置は、研究・開発用としての色あいが強く、生産用としてはスループットが低かった。

これに対して1975年以降、実用的な電子ビーム露光装置が開発されてきた。まず、ひとつの方向に試料をその全長にわたって連続移動させながら、これと直角方向に電子ビームのラスタ走査を行う方法が発表された<sup>7)</sup>。さらに従来のガウス形ビームに対して、電子ビームの形状を矩形にした成形ビーム方式が電子ビーム露光装置の生産性を高めるために開発された<sup>8)~11)</sup>。

本章では、これらの電子ビーム露光装置の種類とその特長について述べるとともに、本研究に用いた電子ビーム露光装置である、JBX-5A (日本電子製) について詳細な説明を行う。

### 2.2 電子ビーム露光装置の種類

これまでに多くの電子ビーム露光装置が開発されているが、それらは、電子ビームの形状、電子ビームの走査方式、試料の移動方式により分類することができる<sup>12)~13)</sup>。

#### 2.2.1 電子ビームの形状

電子ビームの形状によりガウス形ビーム方式と成形ビーム方式に分けられ、成形ビーム方式はさらに固定成形ビーム方式<sup>8)</sup>と可変成形ビーム方式<sup>9)~11)</sup>に分けることができる。図2.1にこれら電子ビームの形状を示す。

ガウス形ビームは、走査電子顕微鏡と同様に電子ビームを細く絞った場合で、ビーム形状は円形で、半径方向の電流分布はほぼガウス分布となる。あるパターンを描画する場合には図2.1(a)に示すように、円形のビームを走査して、パターンを塗りつぶしてゆく。

微細パターンを高速で描画するためには、電子ビームのスポット径が小さく、電流が大きいことが必要である。しかしこの二つは相反する要素であり、露光装置の実用的なガウス形ビームの大きさは露光電流との兼ねあいで決められる。

今、球面収差のみを考えると、ガウス形ビームの直径  $d$  と露光電流  $I$  との関係は、

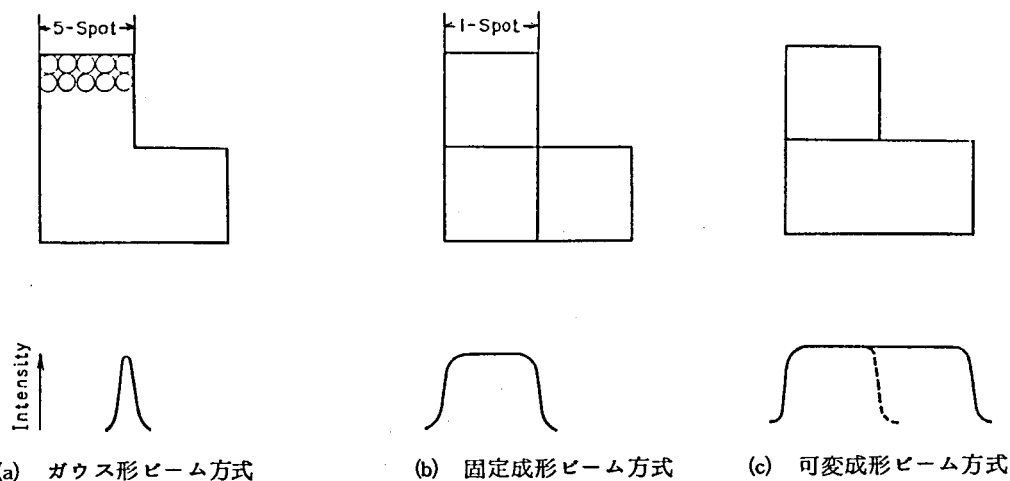


図 2.1 電子ビームの形状

$$I = (J_0 e V / \pi k T) (3 \pi^2 / 16) C_s^{-2/3} d^{8/3} \quad (2.1)$$

で与えられる<sup>14)</sup>。ここで

$J_0$  カソードの放出電流密度

$V$  加速電圧

$k$  ボルツマン定数

$C_s$  レンズの製作精度により決まる、球面収差にかかわる係数

である。露光電流  $I$  はガウス形ビームの直径  $d$  の  $8/3$  乗で変化する。最初のかっこ内の項は光源の輝度になっているので、ガウス形ビームの直径を一定の大きさにして、できるだけ大きい電流をえるためには、輝度の大きい光源を使えばよい。ホウ化ランタン ( $\text{LaB}_6$ ) の電子銃や電界放出型の電子銃では、タングステン (W) ヘヤピン型の電子銃に比べて  $10^2 \sim 10^3$  倍もの輝度が達成される。ビームを偏向させるとさらに偏向収差があらわれる。そのためビームの偏向領域の大きさは制限される。

一方、成形ビーム方式においては、多数の円形スポットに相当する大きな矩形スポットを用いて露光を行う。固定成形ビーム方式では、パターンの最小寸法と同じか、より小さい正方形の電子ビーム・スポットでパターンを走査する。たとえば  $2.5 \mu\text{m}$  □ の正方形を描画するのに、直径  $0.5 \mu\text{m}$  の円形スポットでは  $5 \times 5 = 25$  回の露光が必要であるが、 $2.5 \mu\text{m}$  □ の正方形スポットを用いれば 1 回の露光でよい。しかし正方形スポット内の電流密度分布が平坦であることが必要のため、カソード先端から放出されたビームを広げ、頂点近傍以外を成形アパーチャによって切り落とすため、電流密度は低下し、1 回の露光に要する時間が増すので、露光回数の減少に比例して描画時間が短縮できるわけではない。一方、描画のためのパターンデータ量の観点からみると、スポットビーム方式において、時系列制御により点ビームで必要なパターンを形成するのに用いられるデータ量に比べ、正方形単位のデータによってパターンを形成する

固定成形ビーム方式ではデータ量の低減化が可能である。

可変成形ビーム方式は、成形ビームの大きさを可変にしたもので、高速描画性と高解像性の両立を図っており、固定成形ビーム方式においてパターンの端で生じる二重露光を避けることも可能である。可変成形ビームは、たとえば  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$  の大きさから、 $25 \times 25 \mu\text{m}^2$  の大きさまで  $0.1 \mu\text{m}$  間隔で変えることができる。この成形ビームの大きさは、成形ビーム内の電流密度分布を均一にする必要性和以下に述べる相互作用収差のためにあまり大きくすることはできない。すなわち、成形ビームでは、ビーム電流の増大に起因する空間電荷効果による周辺部のボケが顕著になる<sup>15)</sup>。これは、電子間の相互作用によって電子線のエネルギー変動とともに電子軌道のずれを生じる効果であり、成形ビームの面積が大きい場合には電子光学的収差以上に重大となる。

### 2.2.2 電子ビームの走査方式

電子ビーム露光においてパターンを描画する場合には、図形のない部分は、電子ビームを照射しない状態（ブランキングと呼ぶ）で電子ビームを偏向し、図形のある部分のみ電子ビームを照射した状態で電子ビームの偏向走査を行い、図形を塗りつぶしてゆく。電子ビームを偏向させる走査方式は、図 2.2 (a) に示すラスタ走査方式<sup>7)</sup>と図 2.2 (b) に示すベクター走査方式<sup>16)</sup>がある。ラスタ走査方式は、パターンの有無にかかわらず、電子ビームの走査範囲内を端から端まで走査し、パターンの部分で電子ビームを照射する方式である。ベクター走査方式は描画すべきパターンの部分にのみ電子ビームをもってゆき、照射する方式である。ベクター走査方式では図 2.3 に示すように各種の塗りつぶし方法がある。

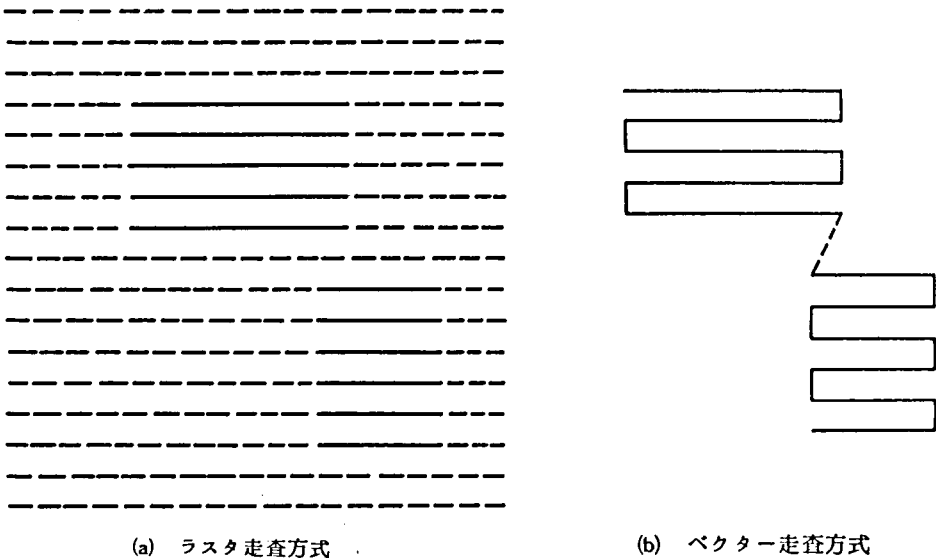


図 2.2 電子ビームの走査方式

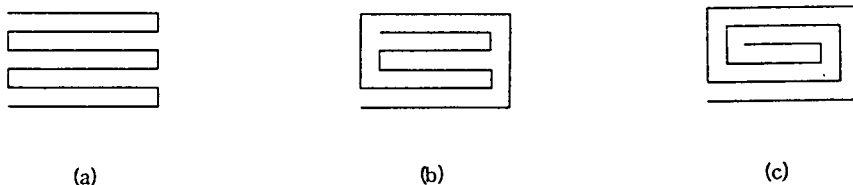


図 2.3 ベクター走査方式における各種の塗りつぶし法

### 2.2.3 試料台の移動方式

Si ウェハやマスクの寸法は直径（または一辺）が 100～125mm と大型化している。これに対して、電子ビームを偏向させて走査できる範囲（フィールド）は、偏向収差とひずみを抑えるために最大 5mm 度である。したがって試料全面を露光するためには試料ステージを機械的に移動しなければならない。試料ステージの動かし方には、

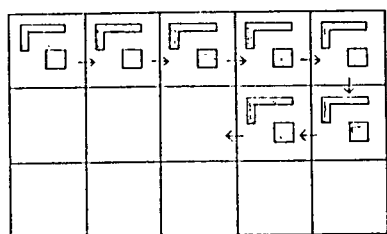
① 描画中はステージは停止しており、そのフィールドの描画完了後、次のフィールドに移動するステップアンドリピート方式（図 2.4(a)）。

② 一方向に試料をその全長にわたって連続移動させながらこれと直角方向にラスタ走査を行う連続移動方式<sup>7)</sup>（図 2.4(b)）の二つがある。

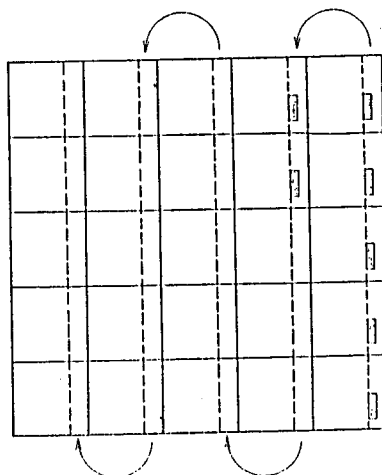
組み合わせる電子ビームの形状は、スポットビーム、成形ビームいずれでもよい。組み合わせる走査方式としては、ステップアンドリピート方式ではベクター走査方式あるいはラスタ走査方式が、連続移動方式ではラスタ走査方式が用いられる。

ステップアンドリピート方式の長所と問題点は以下のとおりである<sup>13)</sup>。

(1) 近接効果（第 7 章に記述）の補正が容易である。また、直接描画の際の重ね合せは、ウ



(a) ステップアンドリピート方式



(b) 連続移動方式

図 2.4 試料の移動方式

エハの変形に対応することができるため合せ精度は高い。

(2) 試料の移動時間がむだ時間となる。そのため偏向領域を大きくすることが必要であるが、ビーム電流が大きく、収差が小さく、偏向領域の大きい電子光学系の設計は容易でない。

連続移動方式とラスタ走査方式を組み合わせた描画方式の長所と問題点は以下のとおりである<sup>13)</sup>。

(1) 電子ビームの偏向方向が一方向だけであり、またその走査領域も小さいので電子光学系の設計が比較的容易である。

(2) ラスタ走査方式では、ビーム偏向は同じ動作のくり返しであるから再現性にすぐれ、磁歴、うず電流などによる描画位置の乱れが生じない。

(3) チップを一つずつまとめて描画しないため、近接効果の補正が困難である。また直接描画の際の重ね合せは、ウエハの周辺部だけであるため、加工工程で不均一なウエハのそり、ひずみなどが生じると対応しきれない。

これまでに市販されている電子ビーム露光装置をまとめると表 2.1 のようになる。この中で本研究に使用した電子ビーム露光装置である、日本電子の JBX-5A について、次節に説明する。

表 2.1 電子ビーム露光装置とその描画方式

型 名	メーカ	描 画 方 式
MEBES-1	P-E/ETEC	ガウス形ビームラスタ走査方式
Ee-BES-40A	Varian/Extrion	ガウス形ビームラスタ走査方式
EBM105	東 芝 機 械	ガウス形ビームラスタ走査方式
JBX-6A	日 本 電 子	可変成形ビームベクタ走査方式
JBX-5A	日 本 電 子	ガウス形ビームベクタ走査方式
JBX-5R	日 本 電 子	ガウス形ビームベクタ走査方式
Beam Writier	Philips	ガウス形ビームベクタ走査方式
EBMF-6	Cambridge	ガウス形ビームベクタ走査方式
ZBA-10	Carl Zeiss Jena	可変成形ビームベクタ走査方式
Mam-7000-EB	G C A	可変成形ビーム方式

## 2.3 電子ビーム露光装置 JBX-5A<sup>17)18)</sup>

JBX-5A はガウスビームベクタースキャン形露光装置であり、微細パターンの形成を目的とする研究開発用装置である。この装置の主な特性を表 2.2 に示す。装置の外観写真を図 2.5 に、制御系と電子光学系の構成を図 2.6 に示す。



表2.2 電子ビーム露光装置JBX-5Aの性能概要

電子ビームの形状	ガウス形ビーム
走査方式	ベクタースキャン方式
ショットタイム	1.25 $\mu$ s $\sim$ 160 $\mu$ s
電子銃	LaB <sub>6</sub>
加速電圧	20 kV
ビーム電流	10 <sup>-12</sup> $\sim$ 10 <sup>-9</sup> A
走査フィールド	0.5mm $\times$ 0.5mm 1 mm $\times$ 1 mm 5 mm $\times$ 5 mm
試料台移動方式	ステップアンドリピート
移動速度	0.8 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ $\sim$ 2.5 $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$
最小図形寸法	0.2 $\mu$ m幅
図形寸法精度	$\pm$ 0.2 $\mu$ m (0.5mmフィールド)
重ね合せ精度	$\pm$ 0.2 $\mu$ m (0.5mmフィールド)
材 料	最大3インチのマスクおよびウエハー

### 2.3.1 電子光学系

露光装置本体の最上部にある電子銃は六ほう化ランタン (LaB<sub>6</sub>) をカソードとした3極銃で、熱的安定のために油冷されている。LaB<sub>6</sub> のチップは両側からカーボンではさまれ、これに直接電流を流す直熱型で、加熱電力が小さい特色がある。電子銃はイオンポンプで排気されており、10<sup>-7</sup> Torr 台で使用する。

電子銃の直下に、平行平板電極のブランキング・ユニットと、2段電磁偏向の軸合せコイルおよび電流測定用のファラデー・カップが配置されている。

レンズ・コラムは2段のコンデンサ・レンズと対物レンズの3段編成でそれぞれに機械的なセンタリング装置を持っている。また、対物レンズは大口径、長集点レンズで、そのワーク・ディスタンス (対物レンズ下面から試料上面までの距離) を2段に切りかえ (85mmと120mm) 使用する。これは、走査範囲を小さくして高解像度の実現を図ることと、解像度を犠牲にしても走査範囲を大きくしたい、という2つの性能を同一装置で実現するためである。

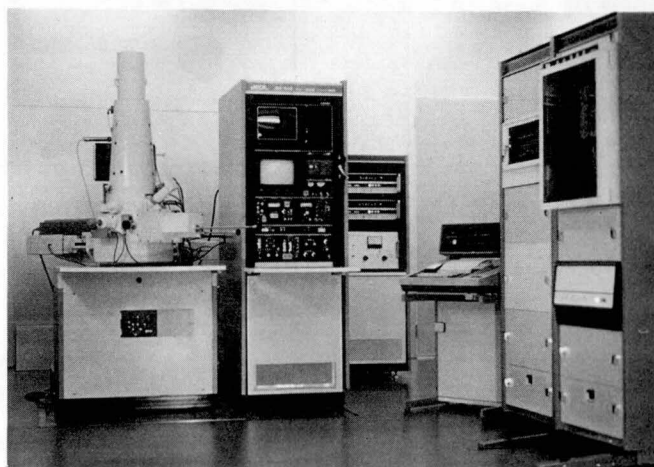
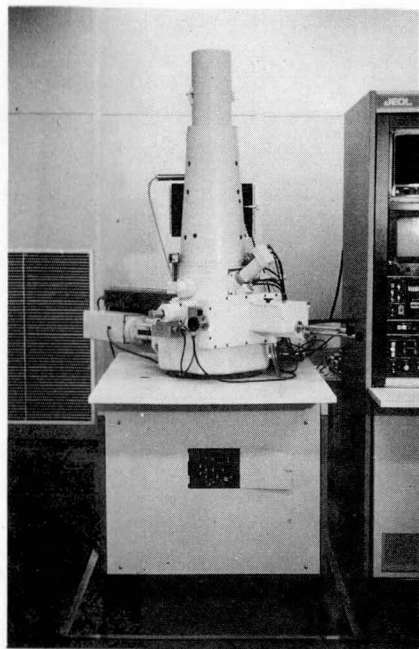


図2.5 電子ビーム露光装置JBX-5Aの外観

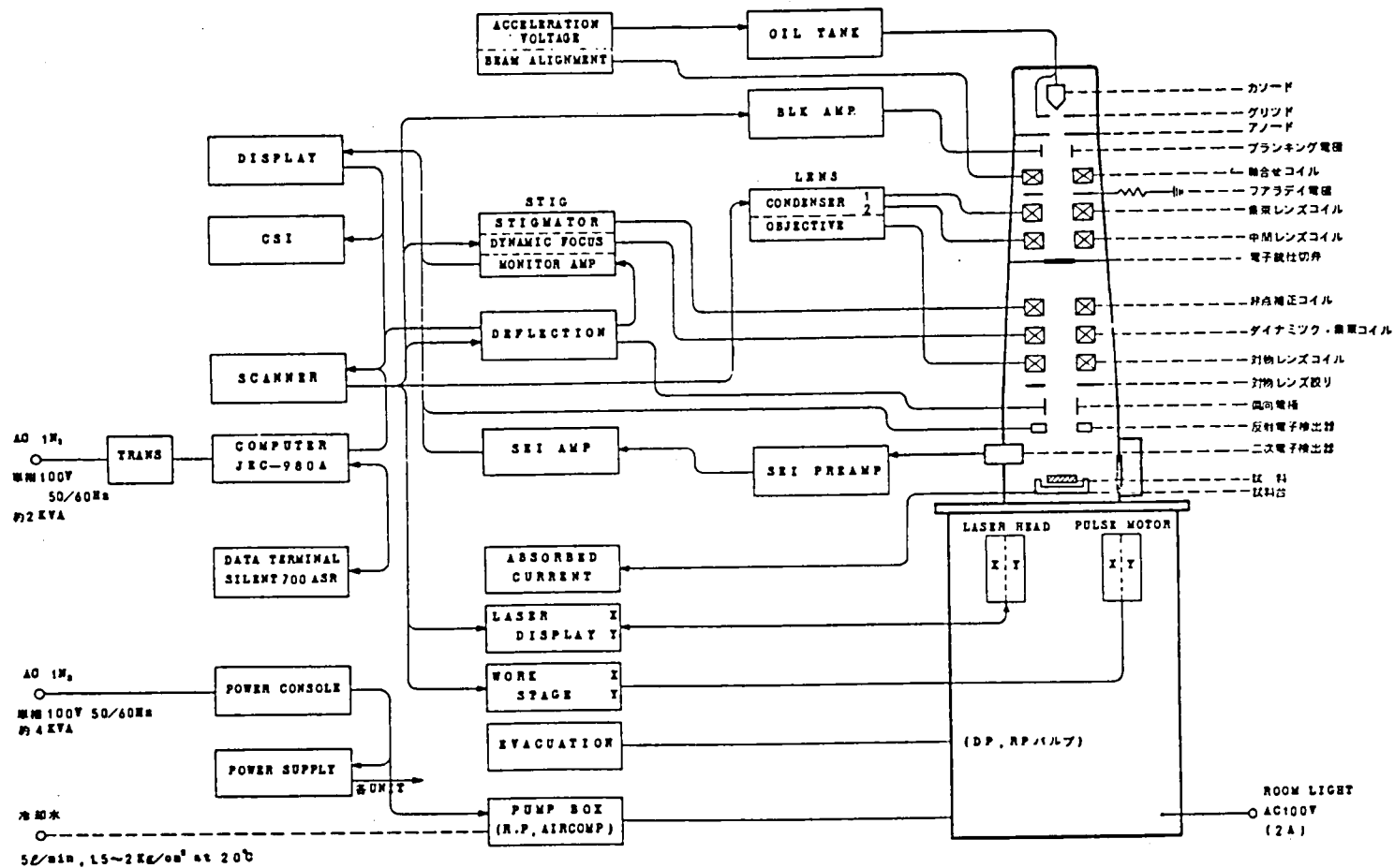


図 2.6 電子ビーム露光装置JBX-5Aの構成

図 2.6 に示したように、対物レンズの内側に手動用の電磁非点補正コイルと、静電 8 極式ダイナミック非点補正器ならびにダイナミック・フォーカス・コイルがある。これはいずれも電子ビームの大偏向時に発生する非点収差と集点のずれを動的に補償するために設けられている。

偏向器は、機械的精度と応答性のよい静電電極 2 組を対物レンズの下に配置している。偏向歪や偏向収差を小さくするため、精密なセンタリングと回転機構で電極を微細調整できる。

試料の表面観測やマークの位置検出用の 2 次電子検出器と反射電子検出器がそれぞれ偏向器の側面と下面に取りつけられている。この検出機能を損なわないような特殊形状の電磁シールドが施され、外部磁場の影響を防いでいる。

以上の下部に、X 方向、Y 方向にそれぞれ 75mm 移動するステージを収納した試料室があり、 $10^{-5}$  Torr 台に油拡散ポンプで排気されている。

なお、カソードからのエミッション電流は、200～400  $\mu\text{A}$  が使われ、3 段レンズと絞りによって適当なガウスビームの大きさと露光電流が用いられる。たとえば露光電流 1 nA のとき、ガウスビームの直径は約 0.2  $\mu\text{m}$  であり、50 pA のとき約 0.05  $\mu\text{m}$  である。

### 2.3.2 制 御 部

電子計算機からでたパターンデータは 2 種類の D-A コンバータをへて偏向増幅器に入り、さらに偏向電極に出力電圧を加えて電子ビームを走査する。

偏向増幅器やダイナミック補償回路およびブランキング回路は速い応答と動的安定性が要求される。ブランキング回路の立ち上り、立ち下り時間は 200 ns で、ダイナミックステイグマとフォーカス回路のセット時間は 50  $\mu\text{s}$  である。偏向増幅器の小振幅動作周波数は 1 MHz であるが、大振幅の場合 200  $\mu\text{s}$  のセット時間が必要である。

D-A コンバータとしては応答速度の遅い 14 ビットと応答速度の速い 10 ビットの 2 種類を組み合わせで使用している。電子ビームの走査開始位置を設定する X、Y 用 14 ビット D-A コンバータと、高速走査させる 10 ビット D-A コンバータ (X、Y 用) である。それぞれのセット時間は 50  $\mu\text{s}$  および 20 ns で、誤差ならびにノイズはともに最小ビットの  $1/2$  である。たとえば走査フィールドの大きさが 1mm $\square$  のときは、14 ビットでは電子ビームの走査点は約 16,000 となり、単位ステップは  $1/16 \mu\text{m}$  となる。14 ビットの D-A コンバータで露光開始位置をきめたあと、つぎの走査には 10 ビットの高速 D-A コンバータを使用し、最大 1000 ポイントの走査を行い、それ以上の長い場合はつなぎ走査を行う。増幅器の応答と直線性から、標準的な走査速度の上限は 0.8 MHz である。

### 2.3.3 機 械 系

電子ビーム露光装置に用いる移動台は電子ビームの微細性が生かせるように十分な精度を持ち、しかも動作時間がきわめて短いこと、安定性の良いことが要求される。

移動台はレーザ測長方式により 0.1  $\mu\text{m}$  単位で測定を行っている。移動はパルスモータにより 1  $\mu\text{m}$  ステップで X、Y にそれぞれ 75 mm まで送られる。移動開始時に 800 Hz で送り始め、順次加速されて 50

パルスで2.5 KHz に達する。停止時はその逆に減速されて指定位置の $\pm 1 \sim 3 \mu\text{m}$ の範囲まで移動して止る。残りの誤差は電子ビームを偏向させて補正する。

#### 2.3.4 直接露光<sup>19)</sup>

ウェハに直接電子ビームでパターンを描画する場合、ウェハ上にマークを設置し、このマークを基準として数層のパターンを露光する。この重ね合せ露光に必要なマークを図2.7に示す。P、Q、R、Sは大トンボマーク、e、f、gを小トンボマークと呼ぶ。大トンボマークは、ウェハと試料台との設定誤差と、ウェハの伸縮を測定するために使われる。一方小トンボマークはウェハと電子ビームの水平ずれ、回転ずれ、寸法ずれを測定する目的に使用されるものである。これらの測定結果がフィードバックされ、自動的に補正される。

マーク検出の原理を図2.8に示す。電子ビームを偏向させてマーク上を走査し、マークのエッジからえられる反射電子の変化量を反射電子検出器により検出する。この検出した信号のピーク点を信号処理により求めピーク点までの距離を計算機により数十回計測し、その平均値を電子ビームに対するマークの位置として求める。この方法によりマークの位置およびマーク間隔を求め、これらに基づき各層のパターンを描画する。

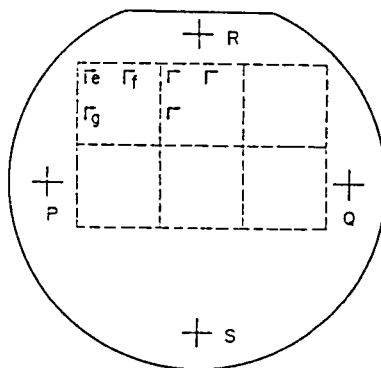


図2.7 重ね合せ露光に必要なマーク

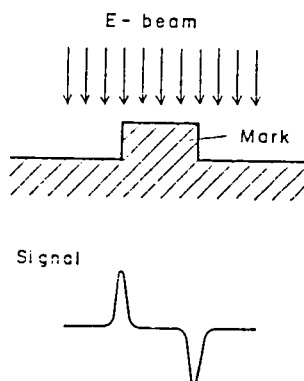


図2.8 マーク検出の原理

## 参 考 文 献

- (1) 垂井康夫, 伝田精一, 馬場玄式, 宮内 栄, 田中一光, "集積回路用電子ビーム露光装置の試作," 電子通信学会論文誌, vol. J 51-C, no. 2, pp.74-81, Feb. 1968.
- (2) W.E. Ozdemir, R.Y. Perkins, and E.D. Wolf, "Precision electron beam microfabrication," J. Vac. Sci. Technol., vol.10, pp.1008-1011, Nov./Dec. 1973.
- (3) B.P. Piwczyk, and K.G. McQuhae, "A fast turn around electron-beam pattern generation system," *ibid.*, vol.10, pp.1016-1019, Nov./Dec. 1973.
- (4) E.B. Friedman, W.R. Livesay, and A.L. Rubiales, "An automated electron-beam mask generator," *ibid.*, vol.10, pp. 1020-1024, Nov./Dec. 1973.
- (5) G.L. Varnell, D.F. Spicer, and A.C. Rodger, "E-beam writing techniques for semiconductor device fabrication," *ibid.*, vol.10, pp.1048-1051, Nov./Dec. 1973.
- (6) N. Saito, C. Munakata, Y. Miura, and Y. Honda, "Computer-controlled electron beam microfabrication machine with a new registration system," Journal of Physics E: Scientific Instrument, vol.7, pp.441-444, 1974.
- (7) D.R. Herriott, R.J. Collier, D.S. Alles, and J.W. Stafford, "EBES: A practical electron lithographic system," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-22, no.7, pp.385-392, July 1975.
- (8) H.C. Pfeiffter, "Recent advances in electron-beam lithography for the high-volume production of VLSI devices, IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.663-674, April 1979.
- (9) G. Cogswell, S. Miyauchi, T. Tanaka, and N. Goto, "Electron lithography system with variable-shaped electron-beam," in 8th Int. Conf. on Electron Ion Beam Sci. Technol., pp.117-134, May 1978.
- (10) M.G.R. Thomson, R-J. Collier, and D.R. Herriott, "Double-aperture method of producing variably shaped writing spots for electron lithography," J. Vac. Sci. Technol., vol.15, no.3, pp.891-895, May/June 1978.

- (11) E.V. Weber and R.D. Moore, "Variable spot shaped e-beam lithographic tool," J. Vac. Sci. Technol., vol.16, no.6, pp.1780-1782, Nov./Dec. 1979.
- (12) 垂井康夫 (編), "超LSI 技術," オーム社.
- (13) 桂木久雄, "電子ビーム露光技術," 電子通信学会誌, vol. 61, no. 8, pp. 884-893, Aug. 1978.
- (14) A.N. Broers, "Microprobe Analysis," ed. C.A. Anderson, John Wiley & Sons, New York, 1973, p.83.
- (15) E. Goto, T. Soma, M. Idesawa, and T. Sasaki, "Design of variable shaped beam system," in 8th Int. Conf. on Electron Ion Beam Sci. Technol., Abstract no.357, May 1978.
- (16) T.H.P. Chang, A.D. Wilson, A.J. Speth, and C.H. Ting, "Vector Scan I: An automated electron beam system for high resolution lithography," in Proc. 7th Int. Conf. on Electron and Ion Beam Sci. and Technol., pp.392-410, 1976.
- (17) 宮内 栄, "ランダムアクセス方式の走査型電子ビーム露光装置," 日経エレクトロニクス, 1976. 1. 12., pp.57-75.
- (18) 日本電子 (編), "電子ビーム露光装置JBX-5A取扱説明書."
- (19) 宮内 栄, 湯浅徹雄, 新田 純, "電子ビーム露光装置の特徴と技術," IONICS, 10月号, pp. 1-18, 1980.



## 第3章 電子ビームレジスト

### 3.1 はじめに

レジストというのは、一般に、①高分子塗膜材料であって、②光・電子ビーム、X線などの放射線を照射することによって、溶媒に対する溶解性が変化する性質を有し、③基板をエッチング加工する際の保護被膜となりうるもの、である<sup>1)2)</sup>。光照射により化学変化をおこすレジストがホトレジストであり、電子ビーム照射により化学変化をおこすレジストが電子ビームレジストである。

電子ビーム露光においては、10～30 kVの電圧で加速された電子ビームが使われる。電子の持つエネルギーは、ホトリソグラフィにおける光の持つエネルギーに比べるとけた違いに大きい。したがって、このような電子ビームは多くの種類の物質に化学変化を起させることができる。

電子ビームレジストを含め、レジストにはポジ形とネガ形がある。図3.1(a)にポジ形電子ビームレジストの動作原理を、図3.1(b)にネガ形電子ビームレジストの動作原理を示す<sup>1)</sup>。電子ビーム照射された部分が穴あきになるレジストがポジ形であり、反対に電子ビーム照射された部分が皮膜として残るタイプがネガ形である。

電子ビーム露光技術においてはレジスト材料の特性が加工の性能に大きな影響を持っている。というのはサブミクロンの微細加工に要求される解像度が、レジストの解像度の限界に近いものとなっているからである。電子ビームレジストについて多くの材料提案がなされているが、実用レジストという観点からはいま一步の感が

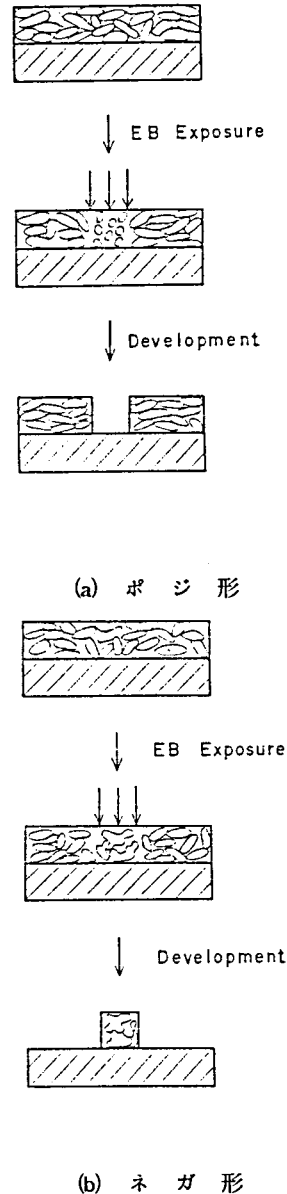


図3.1 電子ビームレジストの動作原理

ある。

ここでは、レジストに対する要求条件、レジストの種類、電子ビームとレジストの反応等について述べる。

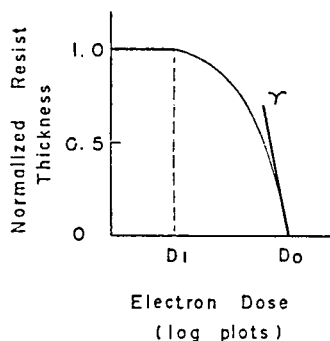
### 3.2 電子ビームレジストに要求される特性<sup>1)3)</sup>

電子ビームレジストに要求される特性のうち、最も基本的なものは感度と解像度である。電子ビームレジストの感度と解像度は次のように定義される。図3.2に露光量に対する規格化残存膜厚をポジ形レジストおよびネガ形レジストについて示す。ポジ形の場合、現像後の膜厚が零になる露光量（図3.2(a)の $D_0$ 点）を感度と定義する。ネガ形の場合、現像後の膜厚が初期膜厚の $1/2$ となる露光量（図3.2(b)のS点）を感度とする。レジストのコントラスト $\gamma$ は図3.2(a)の $D_0$ 点および図3.2(b)のS点のこう配として表わされる。

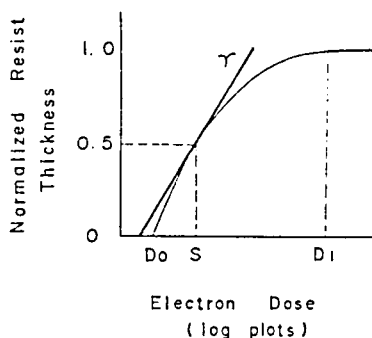
レジストの感度は高い（露光量としては小さい）ほうが望ましく、また解像度が高いほうがよい。一般にネガ形レジストはポジ形レジストに比べて解像度が低い。その理由としては、ネガ形レジストのコントラストが低いことおよびネガ形レジストは現像中、現像液を吸収して膨潤していることがあげられる。ネガ形レジストのもうひとつの問題として後重合効果がある。これは、ネガ形レジストにおいては電子ビーム照射により架橋反応が進むわけであるが、真空中では電子ビームの照射を停止した後も架橋反応が進行し、パターン幅が変化する現象であり、実際にレジストを使う上で問題となる。

電子ビームレジストとくに直接露光に用いるレジストとしては感度、解像度のほかに耐ドライエッチング性が必要とされる。最近の半導体の微細加工にはプラズマや加速イオンを用いたドライエッチングが多く用いられているからである。しかし、現存する電子ビームレジストの多くは耐ドライエッチング性が低く、微細加工を実現する上での大きな問題となっている。

このほか、レジストが真に実用性のあるもの



(a) ポジ形



(b) ネガ形

図3.2 感度とコントラスト( $\gamma$ )の定義

であるためには、レジストの塗布性、ピンホール、ベーキング温度におけるレジストパターンの寸法安定性、基板密着性、耐薬品性、酸素プラズマ加工性などが一定の水準にある必要がある。

### 3.3 電子ビームレジストの種類

電子ビームレジストとして、多くのレジストが提案されている<sup>4)5)</sup>が、実加工に関する諸条件を満たし、実用性のあるものとなると限られたものになり、しかもまだ必ずしも十分な総合特性は持っていない。これはこのようなレジストに対する要求特性の間に、同時に満足させるのが困難な特性の組み合わせが存在するためである。

表3.1に現在入手可能な各種のレジストをまとめて示す。

表3.1 電子ビームレジストの種類

#### ポジ形電子ビームレジストの種類

レジスト名	ポ リ マ ー	開 発 機 関	外 販 文 献
P M M A	ポリメチルメタクリレート	I B M	東京応化 デュポン (6)
P B S	ポリブテンスルフォン	ベ ル 研	ミードケミカル (7)
F B M	ポリヘキサフロロブチルメタクリレート	通 研	ダ イ キ ン (8)
F P M	1.1ジメチルテトラフロロプロピルメタクリレート	通 研	ダ イ キ ン (9)
E B R - 9	ポリトリフルオロエチルクロロアクリレート	共 同 研	東 レ (10)
M P R	メタクリル酸メチル・メタクリル酸共重合体+ポリプロピレングリコールジグリシデルエーテル	松 下	松 下 (11)
FMR-E100	ポリメタアクリルアミド	松下技研	富士薬品 (12)

#### ネガ形電子ビームレジストの種類

P G M A	ポリグリシジルメタクリレート	日 立	東京応化 (13)
S E L - N	ポリメタクリル酸エステル	ソ マ ー ル	ソ マ ー ル (14)
C O P	グリシジルメタクリレート・エチルアクリレート共重合体	ベ ル 研	ミードケミカル (15)
C M S	クロロメチル化ポリスチレン	通 研	東洋曹達 (16)

### 3.4 ポジ形電子ビームレジスト

#### 3.4.1 ポジ形電子ビームレジストの原理<sup>1)</sup>

ポジ形電子ビームレジストとしては放射線分解型高分子が使われる。その代表例はポリメチルメタクリレート(PMMA)である。この材料の分子は長い鎖状の構造を持っている。これに電子ビームが照射され

ると分子切断（主鎖切断）が起り、分子の大きさが小さくなる。そこで、PMMA を基板に塗布し、電子ビーム照射をした後に適当な溶解力の溶媒で現像することによって、照射を受けて小さくなった分子のみを溶かしだし、照射を受けなかった高分子をそのまま基板上に残すことができる。このようにして、放射線分解型高分子をポジ形電子ビームレジストとして利用することが可能である。

### 3.4.2 露光量と分子量の関係<sup>17)18)</sup>

電子ビームを照射する前のレジストの初期数平均分子量を  $M_n$ 、電子ビームが照射されて分解後の数平均分子量を  $M_f$  とする。ここで、入射電子ビームによる 100eV のエネルギー吸収によって結合破壊の起る数として  $G$  を導入する。仮にレジスト内任意の位置における吸収エネルギー密度を  $D$  とすれば、この位置で起る結合破壊の数は  $GD/100$  で、これは単位体積中の最初の分子数  $\rho N_A/M_n$  と照射後の分子数  $\rho N_A/M_f$  の差に等しい。これを整理して次式を得る。

$$M_n/M_f = 1 + GDM_n/100\rho N_A \quad (3.1)$$

ここで、 $\rho$  は密度、 $N_A$  はアボガドロ数をあらわす。この式より感度に相当する電子ビームの照射にとりもなう分子量の変化は、初期数平均分子量に比例することがわかる。すなわち高分子量化により感度を高めることができる。

### 3.4.3 溶解速度

レジストが現像液に溶解していく速度  $R$  は  $M_f$  の関数として実験的に求められており、次式で表わされる<sup>19)</sup>。

$$R = R_0 + B/M_f^A \quad (3.2)$$

(3.1) 式を代入すると、

$$R = R_0 + B(1/M_n + GD/100\rho N_A)^A \quad (3.3)$$

が得られる。 $R_0$ 、 $B$ 、 $A$  は実験により決定する定数であるが、温度や現像液などの実験条件により異なった値を取る。

一方、(3.3) 式とはほぼ同じ意味を持つ、次の実験式で溶解速度を表わすこともできる<sup>20)</sup>。

$$R = R_1(C_m + D/Do)^\alpha \quad (3.4)$$

ここで  $R_1$ 、 $C_m$ 、 $Do$ 、 $\alpha$  は実験により決定する定数であり、 $R_1 C_m^\alpha$  はレジストの膜ベリを表わし、 $C_m$  はレジストの初期分子量に逆比例する量である。

## 3.5 ネガ形電子ビームレジスト

### 3.5.1 ネガ形電子ビームレジストの原理<sup>1)</sup>

ネガ形電子ビームレジストとしては放射線架橋型高分子が使われる。その一例はポリグリシジルメタクリレート (PGMA) である。この材料の分子も PMMA と同様に長い鎖状である。この高分子も電子ビーム照射によって主鎖切断をおこすが、それよりもずっと効率良く分子間に架橋を生ずる。そこで、PGMA の塗布膜に電子ビーム照射した後に溶媒で現像すれば、電子ビーム照射によって架橋し、不溶化した分子

のみが基板に残り、ほかの分子は除去されてしまう。このようにして放射線架橋型高分子をネガ形電子ビームレジストとして用いることができる。

### 3.5.2 露光量と分子量の関係

ネガ形レジストの重量平均分子量を  $M_w$ 、レジストが残り始めるのに必要な最小露光量を  $Q$  とすると、両者の間には次の関係がなりたつ<sup>17)</sup>。

$$Q = 50 e \rho N_A / G_C D M_w \quad (3.5)$$

ここで、 $G_C$  は入射電子ビームによる  $100\text{eV}$  のエネルギー吸収によってレジスト分子の架橋が起こる数であり、 $e$  は電子の電荷、 $\rho$  はレジストの密度である。

(3.5) 式よりレジストはその重量平均分子量が大きいほど、また  $G_C$  値が大きいほど高感度となる。

## 参 考 文 献

- (1) 野々垣三郎, “レジスト材料,” 電子通信学会誌, vol. 63, no. 4, pp. 371-376, April 1980.
- (2) 野々垣三郎, “微細加工を実現する新しい電子線・X線レジスト,” 日経エレクトロニクス, 1977. 1. 24, pp. 86-108.
- (3) 松山謙太郎, “電子線, X線用レジスト材料,” 電子通信学会誌, vol. 61, no. 8, pp. 823-830, Aug 1978.
- (4) M.J. Bowden and L.F. Thompson, "Resist materials for fine line lithography," Solid State Technol., vol.22, no.5, pp.72-82, May 1979.
- (5) 島田潤一, “電子ビーム露光用レジストの種類と特性,” 電子材料, 10月号, pp. 28-34, 1979.
- (6) M. Hatzakis, "Electron resists for microcircuit and mask production," J. Electrochem. Soc., vol.116, no.7, pp.1033-1037, July 1969.
- (7) M.J. Bowden, L.F. Thompson, J.P. Ballantyne, "Poly(butene-1 sulfone) - A highly sensitive positive resist," J. Vac. Sci. Technol., vol.12, no.6, pp.1294-1296, Nov./Dec. 1975.
- (8) M. Kakuchi, S. Sugawara, K. Murase, K. Matsuyama, "Poly (Fluoro Methacrylate) as highly sensitive, high contrast positive resist," J. Electrochem. Soc., vol.124, no.10, pp.1648-1651, Oct. 1977.
- (9) 覚知正美, 菅原駿吾, “電子線描画用ポジ型レジスト材料 (FPM)” 第15回半導体集積回路技術シンポジウム, pp.12-17, 1978.
- (10) T. Tada, "Poly(Trifluoroethyl Alpha-Chloroacrylate) as a highly sensitive positive electron resist," J. Electrochem. Soc., vol.126, no.10, pp.1829-1830, Oct. 1979.
- (11) 日比野邦男, 竹山健一, 森本孝克, 松浦静也, 小西文弥, “ポジ型電子線レジスト (架橋型),” 第10回理研シンポジウム, pp. 175-178, 1979.
- (12) 土屋宗次, 本間正美, 松田俊介, 長谷川克衛, 浅野孝輝, 永松元太郎, “高感度電子ビームポジ型レジスト,” 第11回半導体・集積回路技術シンポジウム, pp. 66-72, 1976.
- (13) T. Hirai, Y. Hatano, and S. Nonogaki, "Epoxide-containing polymers as highly sensitive electron-beam resists," J. Electrochem. Soc., vol.118, no.4, pp.669-672, April 1971.



- (14) 越智英夫, "SEL-N 電子ビーム用ネガ形レジスト," 電子材料, 10月号, pp. 70-74, 1979.
- (15) L.F. Thompson, E.D. Feit, R.D. Heindenreich, "Lithography and radiation chemistry of epoxy containing negative electron resists," Polymer Eng. Sci., vol.14, p.529, 1974.
- (16) S. Imamura, "Chloromethylated polystyrene as a dry etching-resistant negative resist for submicron technology," J. Electrochem. Soc., vol.126, no.9, pp.1628-1630, Sept. 1979.
- (17) H.Y. Ku and L.C. Scala, "Polymeric electron beam resist," J. Electrochem. Soc., vol.116, no.7, pp.980-985, July 1969.
- (18) R.F. Herzog, J.S. Greeneich, T.E. Everhart, and T. Van Deuzer, "Computer-controlled resist exposure in the scanning electron microscope," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-19, no.5, pp.635-641, May 1972.
- (19) J.S. Greeneich, "Developer characteristic of poly-(methyl methacrylate) electron resist," J. Electrochem. Soc., vol. 122, no.7, pp.970-976, July 1975.
- (20) A.R. Neureuther, T.A. Tuttle, and E.J. Walker, "Electron-beam resist edge profile simulation," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.686-692, Apr. 1979.

## 第4章 電子ビームレジストの露光実験

### 4.1 はじめに

理想的なレジストと理想的な露光装置（電子ビーム露光装置とは限らない）を用いれば図3.1に示すような断面が完全に長方形で、しかも微細な形状が、ポジ形レジストについてもネガ形レジストについてもえられるはずである。ところが実際には、露光装置、レジストとも不完全さを持っているので、解像度が制限されてしまう。電子ビーム露光装置において、解像度が低下する主な原因は、レジストおよび基板中で電子が散乱されるために、照射像がぼけることである（この現象については第6章電子ビーム露光により形成したレジスト断面形状のところで詳しく述べる）。

次にレジストについて考えると、実際のレジストは、コントラストがステップ状に変化するのではなく、図3.2に示すようにある傾きを持っているため、現像液に対する溶解部と不溶部の区別があいまいになる。さらに、ネガ形レジストでは、現像中のレジストの膨潤が解像度を低下させるもう一つの原因となる。

現在開発されている電子ビームレジストは、実用レジストとしては必ずしも十分な性能を持っているわけではない。これらのレジストを用いてマスク製作あるいは直接露光における微細加工を実現するためには、各レジストの長所と問題点を適確に把握して、そのレジストの持つ能力を最大限に発揮させるプロセスを用いなければならない。

以上の目的を達成するために、本章では各種レジストの電子ビーム露光実験を行った。実験に用いたレジストはポジ形では、PMMA、MPR、EBR-9であり、ネガ形では、PGMA、CMSである。以下にこれらのレジストの感度、解像度およびその現像条件との関連、耐ドライエッチング性、ネガ形レジストの断面形状について述べる。

### 4.2 電子ビームレジストの諸特性

#### 4.2.1 レジストの塗布

レジストの塗布工程は、塗布前ベーク、スピコート、プリベークからなる。

塗布前ベークは基板表面に吸着されている水分を除去するために行い、Si基板の場合、200℃ 30分の熱処理を行った。スピコート

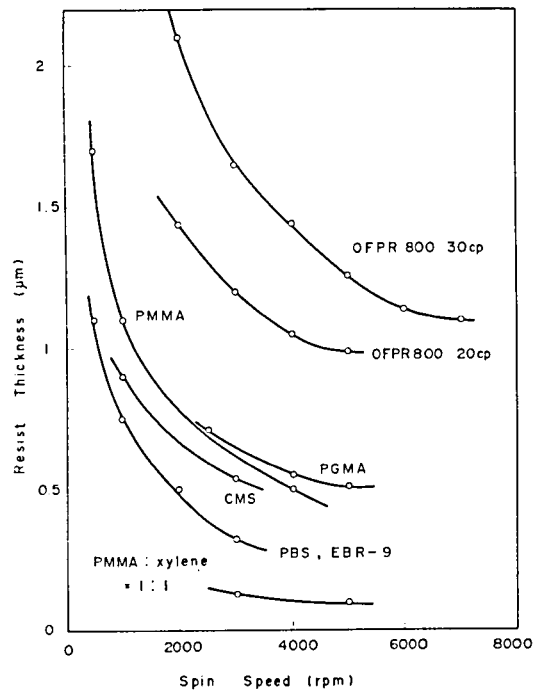


図4.1 レジストの膜厚と回転数

イングはコビルト製 Auto Fabを用いた。図 4.1 に各種レジストの膜厚と回転数の関係を示す。なお、とくに基板との接着を強化したい場合には、レジスト塗布にさきだって接着強化済として、ジメチルクロロシラン（東京応化製 OAP）を薄く（2000 rpm 5 秒）塗布した。

レジスト膜塗布後に溶媒の蒸発とレジストと基板との接着強化を目的としてプリベークを行う。表 4.1 にレジストの塗布とプリベーク条件を示す。

表 4.1 各種レジストの塗布、プリベーク条件

	レジスト	0.5 $\mu\text{m}$ の膜厚形成に必要な回転数 (rpm)	プリベーク条件
ポジ形	P M M A	4 0 0 0	160 $^{\circ}\text{C}$ 20 分
	M P R	4 0 0 0	160 $^{\circ}\text{C}$ 60 分
	E B R - 9	2 0 0 0	200 $^{\circ}\text{C}$ 30 分
ネガ形	C M S	3 0 0 0	110 $^{\circ}\text{C}$ 25 分
	P G M A	5 0 0 0	85 $^{\circ}\text{C}$ 30 分

#### 4.2.2 感 度 曲 線

レジストの感度曲線を求める際には、Si 基板上に約 0.5  $\mu\text{m}$  のレジストを塗布し、JBX-5A を用いて 100  $\mu\text{m}$  □ の正方形を露光量を変えながら描画し、現像後の膜厚を測定した。膜厚の測定にはナノスペック（ナノメトリックス製）およびタリステップ（テラーホブソン製）を用いた。

図 4.2 にポジ形レジスト PMMA、MPR、EBR-9 の感度曲線を、図 4.3 にネガ形レジスト PGMA、

CMS の感度曲線を示す。ここで、縦軸の規格化残存膜厚（normalized resist thickness）は、各露光量における現像後のレジスト膜厚を未露光の現像後のレジスト膜厚で割って規格化した値である。横軸は露光量（electron dose）を表わす。

感度とコントラストおよび現像条件をまとめて表 4.2 に示す。なお、現像液の略号もまとめて付記する。ポジ形レジストにおいては、強現像液を用いるか、弱現像液を用いるかにより、同じレジストでも感度、解像度（コントラスト）が変動する。PMMA を弱現像液（MIBK : IPA = 1 : 3）で用いるとき、最

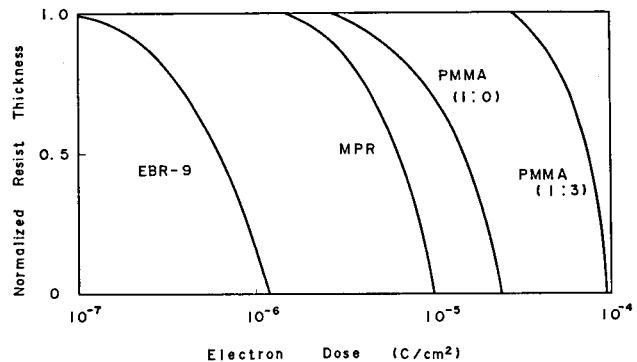


図 4.2 ポジ形レジストの感度曲線

も解像度が高く、 $r = 6.3$ を示す。  
 ただし感度は  $9 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^2$  と低い。  
 一方 EBR-9 は  $1.2 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$  と  
 高感度であるが、 $r = 2.0$  と解像度  
 は低い。

ネガ形レジストにおいては、CMS  
 が感度は  $2.5 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$  と PGMA  
 に比べて低い解像度は、 $r = 2.7$   
 と高い。PGMA は  $5.5 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^2$   
 の感度を持ち高感度である。表 4.2  
 から明らかなように、一般にネガ形  
 レジストはポジ形レジストに比べて、  
 感度は高いが解像度が低い。

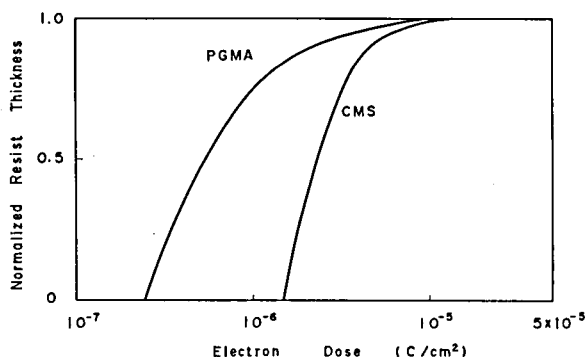


図 4.3 ネガ形レジストの感度曲線

表 4.2 レジストの感度、コントラスト、現像条件

	レジスト	感度 ( $\text{C/cm}^2$ )	$r$	現 像 条 件
ポ ジ 形	P M M A	$9.0 \times 10^{-5}$	6.3	MIBK : IPA = 1 : 3    5分
		$2.5 \times 10^{-5}$	2.8	MIBK : IPA = 1 : 0    5分
	M P R	$1.0 \times 10^{-5}$	3.0	MIBK : A <sub>C</sub> E <sub>t</sub> = 7 : 3    7分
		$1.2 \times 10^{-6}$	2.0	MIBK : IPA = 4 : 1    10分
ネ ガ 形	P G M A	$5.5 \times 10^{-7}$	1.6	M E K : E t A = 7 : 1    3分
	C M S	$2.5 \times 10^{-6}$	2.7	アセトン : IPA = 88 : 12    1分

略号の説明    MIBK (メチルイソブチルケトン)    IPA (イソプロピルアルコール)  
 MEK (メチルエチルケトン)    A<sub>C</sub>E<sub>t</sub> (酢酸エチル)    E<sub>t</sub>A (エチルアルコール)  
 A<sub>C</sub>IA (酢酸イソアミル)

#### 4.2.3 現 像

通常の工程では、電子ビーム露光後に現像工程 (現像、リンス) を行い、そのあとポストバークを行う。  
 現像にはディップ (dip) 法とスプレー (Spray) 法がある。ディップ法は試料を現像液に浸してゆるやかにかくはんする現像方法である。スプレー法は、ノズルから現像液をふきださせて、それを回転した試料上に噴射させる方法である。ディップ法の欠点はレジスト残渣が多いことである。この章における実験では、レジストの特性を調べることを主目的としており、最終的デバイスやマスクの製作を意図していないので、現像は主としてディップ法を用いた。スプレー法を用いる場合は、A P T 製のレジストプロセッサーを使用した。現像液を使用した後、現像液を完全に除去するためにリンスを行い、最終に窒素をふきつけて乾燥する。さらに、基板との接着性を強化するためにポストバークを行うが、とくにシャープな形状

のレジストパターンを維持するためには、ポストベークしないほうがよい。ここでは、ポストベークは行わなかった。

ポジ形レジストの場合は、感度、解像度が現像条件に大きく依存する。現像条件とは、現像液の組成（強現像液であるか、弱現像液であるか）、現像温度、現像時間、現像方法（ディップ法とスプレー法）などである。

ここでは、EBR-9の感度と解像度が現像条件によってどのように変るかを調べた結果を述べる。なおPMMAとMPRについては、第6章・第8章で述べる。

図4.4～図4.6にEBR-9の感度曲線を示す。規格化残存膜厚は、未露光部の膜厚を明確に表わすために、4.2.1では未露光部の現像後の膜厚に対して規格化を行っていたが、ここでは、現像前の膜厚に対して規格化を行った。

図4.4は標準現像液（MIBK：IPA＝4：1、23℃）について現像時間に対する感度、解像度の依存性を調べたものである。現像時間2.5分で感度 $7.6\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、15分で感度 $0.6\mu\text{C}/\text{cm}^2$ となる。現像時間の増加とともに $r$ は低下するが、その変化は比較的小さく、また膜べりは $0.025\mu\text{m}$ 程度で小さい。現像時間を長くすることにより、感度が10倍程度高くなり、そのかわりに解像度が低下する。膜べりは小さいので、長時間の現象が許容できる場合には、EBR-9は長時間現像で使用するほうが有利である。しかし、実際の工程では現像時間は短いほうが望ましい。

図4.5に強現像液（酢酸エチル：酢酸イソアミル＝1：3）に対するEBR-9の感度曲線を示す。強現像液を用いることにより、短い現像時間で高感度を実現できるが、膜べりが非常に大きい。強現像液は、膜

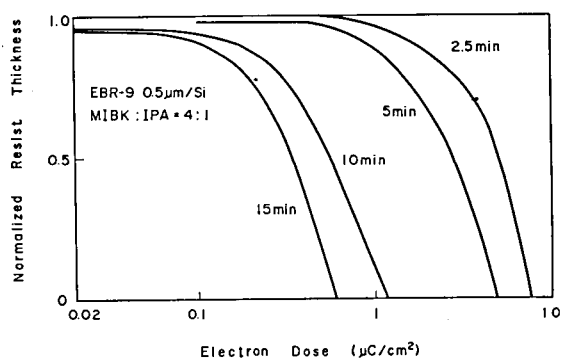


図4.4 EBR-9の感度曲線（現像時間依存性）

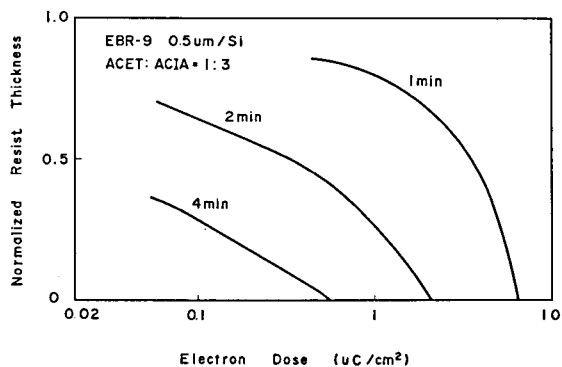


図4.5 EBR-9の感度曲線（強現像液）

べりが大きくなるため使用できない。

図 4.6 に標準現像液を用いて、現像温度を変えた場合を示す。現像温度を 28℃ にすることにより、感度は常温 (28℃) の 10 倍となる。また、膜べり、コントラストの低下も小さい。温度をさらにあげて 32.5℃ にすると、膜べりが大きく、コントラストも悪くなる。

図 4.7 に各種現像条件について、感度 — 膜べり特性を示す。表 4.3 に感度と膜べりをまとめて示す。レジストを評価する場合、感度と解像

度が最も重要と考えられるが、ここでは測定のしやすい膜べりを解像度に相関する量として選んだ。図 4.7 において、左下にある (すなわち感度が高く、膜べりが小さい) はどレジストとして望ましい。図より、標準現像液、温度 28℃、現像時間 5 分の条件が感度、膜べり両者を考えるととってもよいことがわかる。

つぎにネガ形レジスト CMS についての結果を述べる。図 4.8 に CMS の現像時間に対する規格化残存膜厚の変化を示す。CMS の初期膜厚は 0.54 μm、現像液はアセトン：IPA = 88：12 である。現像時間が 10 秒と 1 分では残存膜厚はすこし変わるが、1 分以上ではほとんど変化せず、現像時間に対する依存性は小さい。また解像度についてもあまり変化はなかった。

つぎに現像液として、アセトン：IPA = 88：12 のほかに、

MIBK：IPA = 7：1、アセトン、MIBK、AcEt：AcIA = 1：1 を用いて、感度と解像度を調べた。感度については、どの現像液を用いても同じであったが、解像度については、アセトン、MIBK、AcEt：AcIA = 1：1 の現像液を用いる場合には膨潤による解像度の低下が認められた。

CMS については適切な現像液を用いれば、感度、解像度は現像条件にあまり依存しない。

ネガ形レジストについては露光後、真空中で架橋反応が進行し続けてパターン幅が変化する現象 (後重

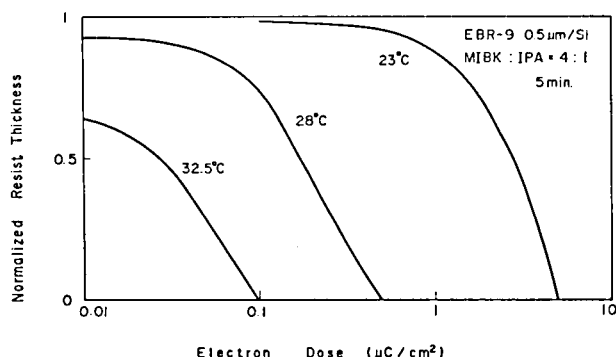


図 4.6 EBR-9 の感度曲線 (温度依存性)

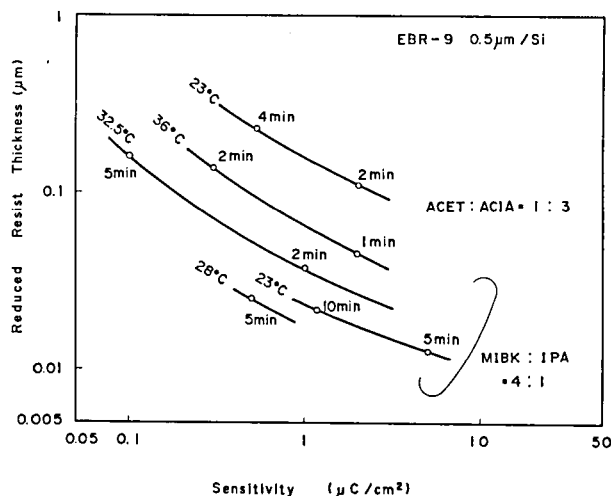


図 4.7 EBR-9 の感度 — 膜べり特性

表 4.3 EBR-9 の感度と膜べり

感 度 ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	膜 べ り ( $\text{\AA}$ )	現 像 条 件	現像時間 (min)
7.5	—	MIBK : IPA = 4 : 1    23℃	2.5
5.0	130	“	5
1.2	220	“	10
0.6	255	“	15
6.0	218	$\text{AcEt} : \text{AcIA} = 1 : 3$ 23℃	1
2.0	1110	“	2
0.6	2280	“	4
0.2	1190	MIBK : IPA = 4 : 1    31℃	5
2.0	400	“    31℃	2
0.3	1384	“    36℃	2
2.0	441	“    36℃	1
0.1	1543	“    32.5℃	5
1.0	376	“    32.5℃	2
0.5	258	“    28℃	5
0.2	1949	“    37℃	2

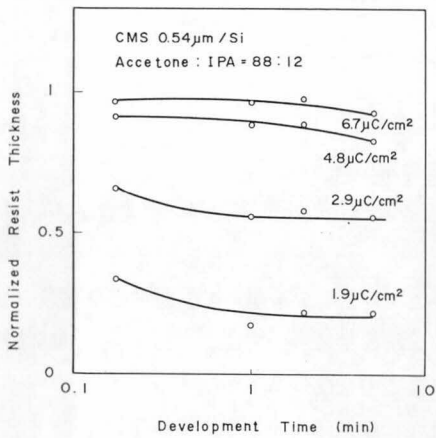
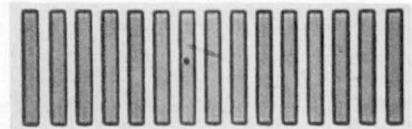
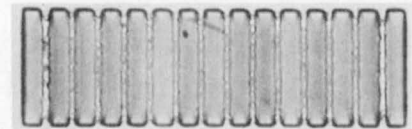


図 4.8 CMS の現像時間と残存レジスト膜との関係



(a) 真空キュアー 30 分



(b) 真空キュアー 64 時間

図 4.9 PGMA の後重合効果

合効果) がより問題となる。図 4.9 に PGMA の後重合効果を示す。(a)は露光後 30 分真空中に放置したもの、(b)は露光後 64 時間真空中に放置したものである。パターン巾に著しい変化が見られる。CMS はネガ形であるが、後重合効果が見られない。表 4.4 に露光後ただちに取り出した試料と、露光後真空中に 15 時間放置した試料の残存レジスト膜厚を示す。両者とも、レジスト膜厚は同じであり、後重合効果は認められない。

表 4.4 残存 CMS 膜厚の真空キュア時間による変化

露 光 量 ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	残存 CMS 膜厚 ( $\mu\text{m}$ )	
	真空キュアなし	真空キュア-15 時間
1.9	0.134	0.141
2.8	0.348	0.326
4.8	0.461	0.459
6.7	0.492	0.506
9.6	0.505	0.527

表 4.5 レジストのエッチレート

レジスト	エッチレート ( $\text{\AA}/\text{min}$ )	
	円筒型装置	平行平板型装置
AZ1350	110	2000
PMMA	300	3200
M P R	300	3200
EBR-9	330	—
P B S	3500	8000
PGMA	230	—
C M S	70	1300

エッチング条件

円筒型装置 400W、 $\text{O}_2$ ガス、10Torr

平行平板型装置 200W、 $\text{O}_2$ ガス、0.4Torr

#### 4.2.4 耐ドライエッチング性

耐ドライエッチング性の実験は、2 種類のプラズマエッチング装置を用いて行った。ひとつは円筒型プラズマエッチング装置 (LFE 製 PES/PCrE/PDS501) であり、もうひとつは平行平板型プラズマエッチング装置 (アネルパ製 DEM451) である。

表 4.5 に各種レジストの  $\text{O}_2$  プラズマに対するエッチレートを示す。エッチング条件は、円筒型装置においては、高周波出力 400W、 $\text{O}_2$ ガス圧力 10Torr であり、平行平板型装置においては高周波出力 200W、 $\text{O}_2$ ガス圧力 0.4Torr である。AZ1350 よりもエッチレートが小さいのは CMS のみであり、他の電子ビームレジストはすべて AZ1350 よりエッチレートが大きく、十分な耐ドライエッチ性を持っていない。

図 4.10 に  $\text{SiO}_2$  膜のエッチング条件におけるレジストの膜べりを示す。平行平板型装置を用い、高周波出力は 200W、圧力は 70mTorr、エッチングガスは  $\text{C}_3\text{F}_8$  と  $\text{H}_2$  の混合である。PMMA の膜べりが  $\text{SiO}_2$  のエッチ量より大きいのにに対し、CMS、AZ2400 の膜べりは  $\text{SiO}_2$  より小さく、 $\text{SiO}_2$  膜の加工にこれらのレジストを使用することができる。

なお、第 10 章サブミクロンマスクの製作において、電子ビームレジストをマスクとしたクロムのエッチングについて述べる。



### 4.3 ネガ形レジストの断面形状

本節ではネガ形レジストについて電子ビーム露光、現像後の断面形状をSEMにより観察した結果を述べる。これは解像度の限界をつかみ、微細パターン形成の指針を得るために、きわめて重要である。なおポジ形レジストの断面形状については、第6章でシミュレーション結果と比較させながら説明し、第8章ではリフトオフ技術と関連させて述べる。

#### 4.3.1 PGMAの断面形状

レジストの断面形状はレジストがついたままの試料を割り、Auを約 $200\text{ \AA}$ の厚さに蒸着後、走査電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。

PGMAレジストの断面SEM写真を図4.11～図4.14に示す。Si

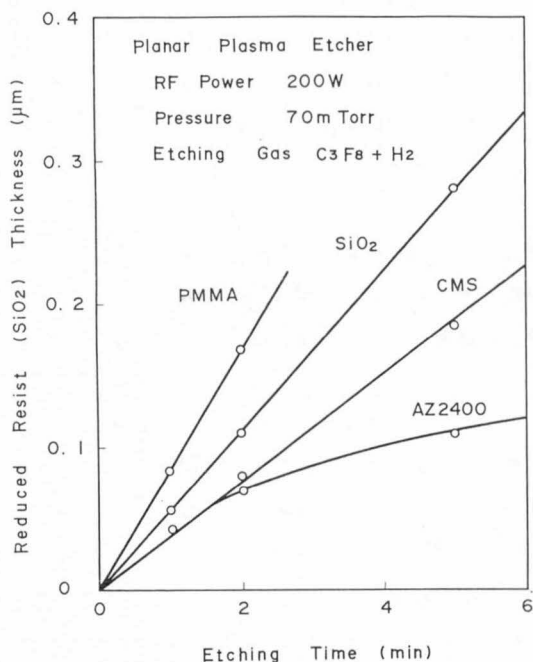
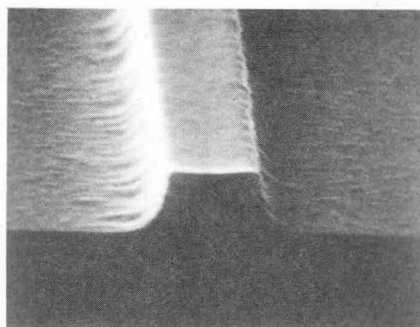
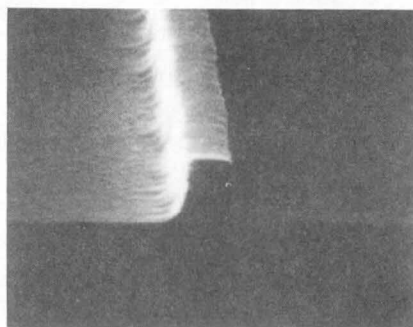


図4.10 SiO<sub>2</sub>のドライエッチングにおけるレジストの膜べり



(a)  $l = 16$



(b)  $l = 8$

図4.11 PGMAレジストの露光、現像後の断面形状  
露光量  $1.8\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、走査線間隔  $0.06\text{ }\mu\text{m}$

基板上にPGMAレジストを $0.53\mu\text{m}$ 塗布し、電子ビーム露光後30分間のキュアリングを行って、MEK:EtA=7:1の現像液を用いて3分間現像を行った。

図4.11、図4.12、図4.13はシングルラインを描画したもので、露光量は、それぞれ $1.8\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、 $1.2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、 $0.7\mu\text{C}/\text{cm}^2$ である。

(a)は走査線数16本、(b)は8本、(c)は5本であり、走査線間隔は $0.06\mu\text{m}$ 、ビーム径は約 $0.05\mu\text{m}$ である。

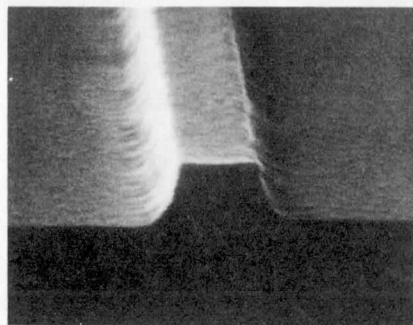
$0.7\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の露光量では露光アンダーであり、残膜率は60%である。 $1.2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ の露光量ではほぼ適正露光と考えられ、残膜率は90%である。 $1.8\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ではすこしひげの発生が多くなる。図4.12(c)において線巾 $0.2\mu\text{m}$ のほぼ矩形の微細レジストパターンが実現されている。これはネガ形レジストとしては、これまでにないよい値である。

図4.14に $0.5\mu\text{m}$ ラインアンドスペースの描画例を示す。露光量は $1.1\mu\text{C}/\text{cm}^2$ である。ラインとラインがブリッジしてつながっている。露光量を変えてもこのブリッジをなくすことはできなかった。また $1\mu\text{m}$ ラインアンドスペースにおいてもブリッジが発生した。シングルラインの場合、 $0.2\mu\text{m}$ まで描画できることを考えると、このブリッジの原因はレジストの膨潤によるものと考えられる。

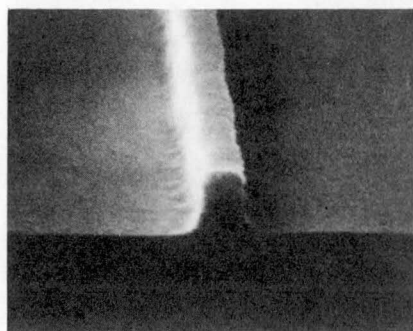
以上まとめると、PGMAレジストを用いて露光量を適当に設定することにより、シングルラインでは $0.2\mu\text{m}$ まで描画可能である。しかし、現像中の膨潤のためにラインアンドスペースの解像度はかなり低くなる。

#### 4.3.2 CMSの断面形状

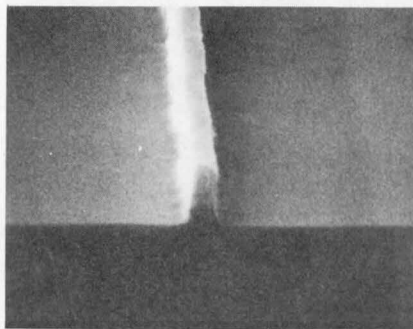
CMSレジストの断面SEM写真を図4.15



(a)  $l = 16$

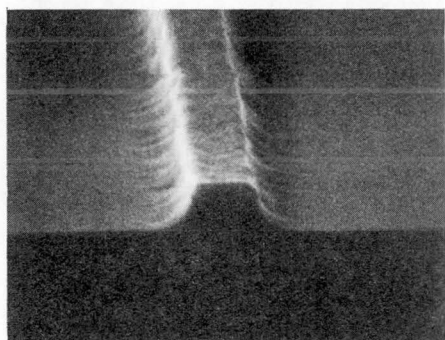


(b)  $l = 8$



(c)  $l = 5$

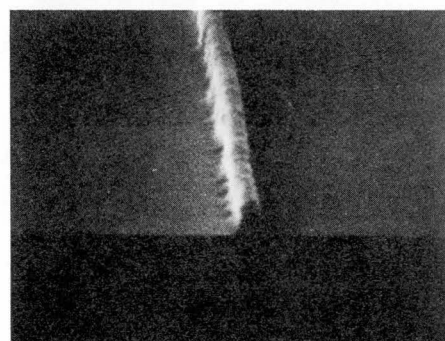
図4.12 PGMAレジストの露光、現像後の断面形状  
露光量  $1.2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、走査線間隔  $0.06\mu\text{m}$



(a)  $l = 16$



(b)  $l = 8$



(c)  $l = 5$

図 4.13 PGMAレジストの露光、現像後の断面形状

露光量  $0.7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$

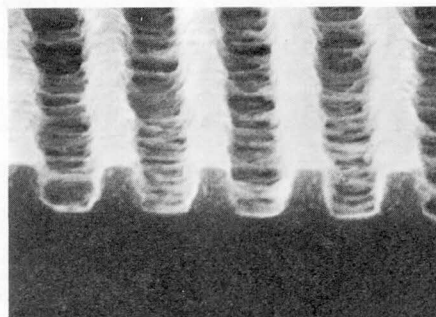


図 4.14 PGMAレジストの露光、現像後の断面形状

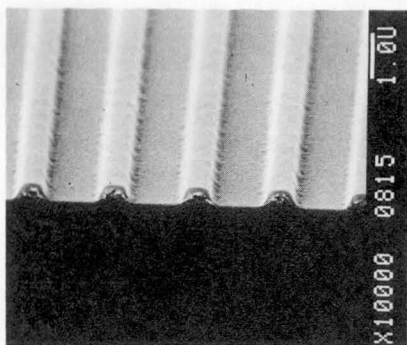
露光量  $1.1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$

$0.5 \mu\text{m}$ ライン ( $l = 8$ ) および

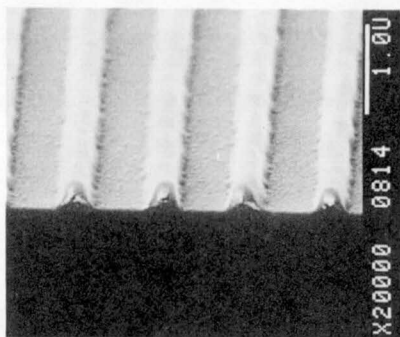
$0.5 \mu\text{m}$ スペース ( $l = 8$ )

～4.17 に示す。Si 基板上にCMSレジストを  $0.53 \mu\text{m}$  塗布し、電子ビーム露光後、アセトン：イソプロピルアルコール＝88：12の現像液を用いて、1分間現像を行った。

図 4.15、4.16 はラインアンドスペースを描画したものであり、露光量はそれぞれ、 $4.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  および  $6.4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  である。(a)は入力設計値が  $0.9 \mu\text{m}$ ライン(走査線数 14本)および  $1.1 \mu\text{m}$ スペース(走査線数 18本)であり、(b)は  $0.4 \mu\text{m}$ ライン(走査線数 6本)および  $0.6 \mu\text{m}$ スペース(走査線数 10本)である。 $0.9 \mu\text{m}$ ラインおよび  $1.1 \mu\text{m}$ スペースを描画する場合は、 $6.4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ のほうが肩の部分がきれいなレジスト断面形状となり、残膜率も 90%と高い。露光量が  $4.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ で露光すると、残膜率は 80%でレジストの肩の部分が丸くなる。一方、 $0.4 \mu\text{m}$ ラインおよび  $0.6 \mu\text{m}$ スペースを描画する場合は、露光量が多いと( $6.4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ )ブリッジが生ずるので、 $4.8 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ が適正露光量である。

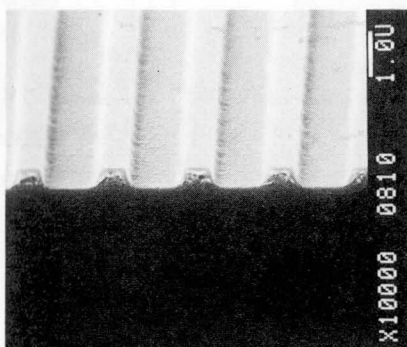


(a)  $0.9\ \mu\text{m}$ ライン ( $\ell = 14$ ) および  
 $1.1\ \mu\text{m}$ スペース ( $\ell = 18$ )

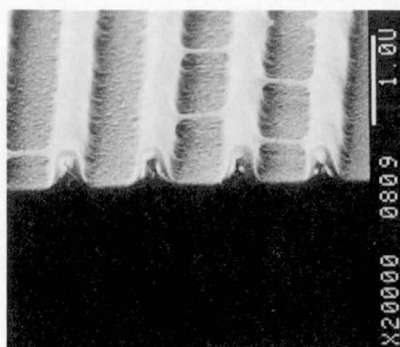


(b)  $0.4\ \mu\text{m}$ ライン ( $\ell = 4$ ) および  
 $0.6\ \mu\text{m}$ スペース ( $\ell = 10$ )

図 4.15 CMSレジストの露光、現像後の断面形状  
露光量  $4.8\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、走査線間隔  $0.06\ \mu\text{m}$



(a)  $0.9\ \mu\text{m}$ ラインおよび  $1.1\ \mu\text{m}$ スペース



(b)  $0.4\ \mu\text{m}$ ラインおよび  $0.6\ \mu\text{m}$ スペース

図 4.16 CMSレジストの露光、現像後の断面形状  
露光量  $6.4\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、走査線間隔  $0.06\ \mu\text{m}$

図 4.17 にシングルラインの描画例を示す。露光量は  $6.4\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、走査線数は 5 本である。線巾は  $0.3\ \mu\text{m}$ 、残膜率は 70 % である。

CMS レジストはひげの発生が少なく、ラインアンドスペースの描画においても  $0.5\ \mu\text{m}$  程度の高い解

像度を持っている。

#### 4.4 ま と め

各種レジストの電子ビーム露光実験の結果を述べた。ポジ形レジストPMMA、MPR、EBR-9およびネガ形レジストPGMA、CMSの感度曲線を求めた。ポジ形レジストではPMMA（弱現像）が最も高解像度であるが、感度は低く、EBR-9は高感度であるが解像度は低い。ネガ形レジストはポジ形レジストに比べて感度は高いが、解像度は低い傾向にある。その中でCMSは比較的解像度も高い。

感度と解像度の現像条件に対する依存性をEBR-9およびCMSについて調べた。EBR-9については、標準現像液（MIBK:IPA=4:1）28℃の条件が、感度と解像度を考えると最も有効であることを明らかにした。またネガ形レジストのCMSについては、感度が現像条件にほとんど依存しないこと、解像度は弱現像液を用いるほどよいことを示した。

耐ドライエッチング性については、CMSがホトレジストのAZ1350よりすぐれた耐性を示し、他の電子ビームレジストはすべてAZ1350より劣っていた。

ネガ形レジストPGMA、CMSの電子ビーム露光、現像後のレジスト断面形状をSEMにより観察した。PGMAでは、現像液中の膨潤のためにパターンが微細化するとラインアンドスペースの描画が困難である。一方、CMSについては0.5μmラインアンドスペースまで描画可能である。ネガ形レジストの断面形状については、これまでに理論的解析がほとんど行われておらず、ここに示した実験データを説明できるような、理論的解析は今後に残された問題である。

現在までに開発されている電子ビームレジストは、感度、解像度、耐ドライエッチング性という点で必ずしも満足できる性能を持っていない。よりすぐれた性能を持つレジストの開発が望まれる。

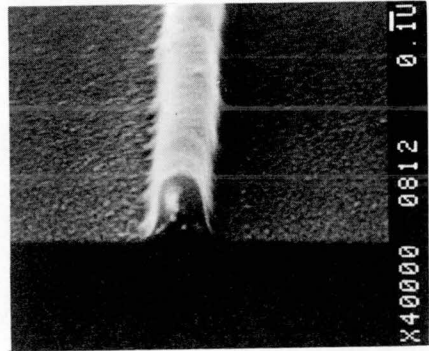


図 4.17 CMSレジストの露光、現像後の断面形状  
露光量  $6.4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、走査線間隔  $0.06 \mu\text{m}$   
 $l = 5$

## 第5章 ホトレジストの電子ビーム露光実験

### 5.1 はじめに

電子ビーム露光が始められた当初は、通常のホトレジストが電子ビームレジストとして使われていた<sup>1)</sup>。やがて、各種の電子ビームレジストが開発されるにつれて、ホトレジストは、感度と解像度の点で問題があるため姿を消していった。

しかし、第4章で述べたように現在開発されている電子ビームレジスト、とくにポジ形レジストは耐熱性、耐ドライエッチング性が低い。一方、微細パターンを形成するためのプロセス技術としては、ドライエッチングやリフトオフが用いられることが多く、その際レジストとして必要な条件は耐熱性が高く、耐ドライエッチング性が高いことである。一般に、ポジ形ホトレジストとして知られるジアゾレジスト(AZ1350など)<sup>2)</sup>は電子ビームレジストに比べて耐熱性、耐ドライエッチング性にすぐれている。この点に着目してジアゾレジストを用いたパターンの形成が電子ビーム露光により行われている<sup>3)~7)</sup>。

ジアゾレジストは、電子ビーム照射に対してポジ形となるが、露光量の大きい領域ではネガ形に反転する<sup>1)</sup>。ポジ形レジストとしての電子ビーム露光特性はM. Hatzakisにより調べられている<sup>3)4)</sup>。これに対して、AZ1350Jを電子ビーム露光した後、全面を紫外線露光することによりネガ形レジストとして使用する報告例がある<sup>5)6)</sup>。

一方、素子の製作工程においては、エッチングがくり返し行われるので基板に凹凸が生じているのが普通である。この凹凸のある基板上にレジストを塗布し、露光する場合、レジストによる基板段差のステップカバレッジおよび基板段差に起因するレジストパターン幅の変化が問題となる<sup>9)~12)</sup>。

本章では、ジアゾレジストの電子ビーム露光特性について実験した結果を述べる。はじめに、ポジ形からネガ形への反転とその現像条件、基板に対する依存性を調べ、つぎに段差を持つ基板におけるジアゾレジストのステップカバレッジとパターン幅の変化について記述する。

### 5.2 ジアゾレジストの電子ビーム露光特性

#### 5.2.1 実験

Si、GaAs、および酸化膜つきGaAs基板上に各種ジアゾレジストを塗布し、85℃、20分間のブリベークを行った後電子ビーム露光を行い、現像後のレジスト膜厚を測定した。電子ビーム露光には、日本電子製JBX-5Aを用い、16走査点1μmで一辺が0.2mmの正方形を描画した。現像液はAZ2401デベロッパー、MF312、NMD-3を用いて液温23℃で現像を行った。レジスト膜厚はタリステップおよびナノスペックを用いて測定した。

#### 5.2.2 結果および検討

図5.1にAZ2401デベロッパー：H<sub>2</sub>O=1：4の現像液に対する、Si基板上の各種ジアゾレジス

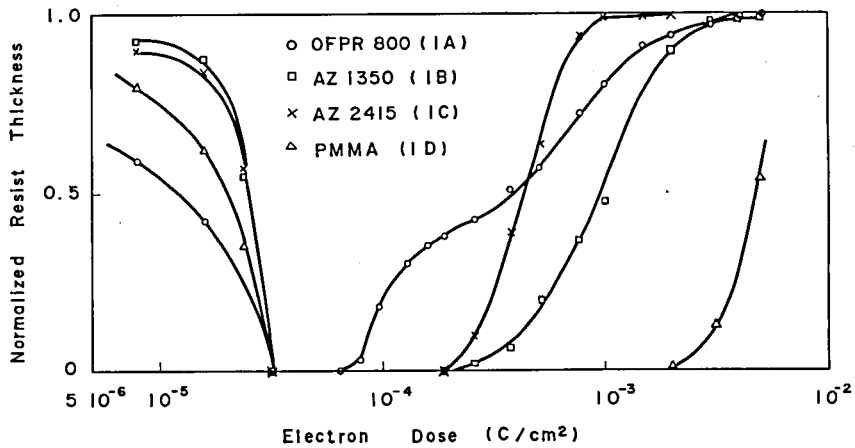


図 5.1 ジアソレジストの感度曲線 I  
現像液 AZ 2401 デベロッパー : H<sub>2</sub>O = 1 : 4

表 5.1 ジアソレジストの電子ビーム露光実験における実験条件

図	曲 線	レジスト膜厚 (μm)	基 板	
5.1	1 A	OFPR 800 1.1	Si	AZ 2401 デベロッパー : H <sub>2</sub> O = 1 : 4 40 秒
	1 B	AZ 1350 0.8	Si	同 上 60 秒
	1 C	AZ 2415 0.8	Si	同 上 120 秒
	1 D	PMMA 0.5	Si	MIBK 240 秒
5.2	2 A	OFPR 800 1.1	Si	NMD - 3 2 分
	2 B	OFPR 800 1.1	Si	NMD - 3 5 分
	2 C	AZ 1350 0.8	Si	MF 312 : H <sub>2</sub> O = 5 : 2 30 秒
5.3	3 A	OFPR 800 1.1	Si	AZ 2401 デベロッパー : H <sub>2</sub> O = 1 : 4 40 秒
	3 B	OFPR 800 1.1	GaAs	同 上
	3 C	OFPR 800 1.1	SiO <sub>2</sub> / GaAs	同 上
5.4		OFPR 800 1.1	Si	エチルアルコール 60 秒

トの残膜率を示す。比較のために PMMA の MIBK (メチルイソブチルケトン) に対する残膜率も同時に示す。実験条件は表 5.1 にまとめて示した。

ポジ形としての感度は実験したレジストすべてについて  $3 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^2$  である。ネガ形への反転は、PMMA の場合  $2 \times 10^{-3} \text{ C/cm}^2$  以上の露光量で起こり、ポジ形の感度に対して約 70 倍の大きさである。これに対して、ジアソレジストの場合はポジ形の感度に対して数倍の露光量でネガ形へ反転する。ネガ形

への反転がおきる露光量は、OFPR 800 では  $8 \times 10^{-5} \text{ C/cm}^2$ 、AZ 1350、AZ 2415 では  $2 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^2$  である。

図 5.2 にメタルフリーの現像液を用いた場合の残膜率を示す。実験条件は表 5.1 にまとめて示すが、現像液として OFPR 800 については NMD-3 を、AZ 1350 については MF 312 を用いた。現像液を変えてもネガ形への反転がおきることは変らない。NMD-3 と OFPR 800 を用いる場合には、現像時

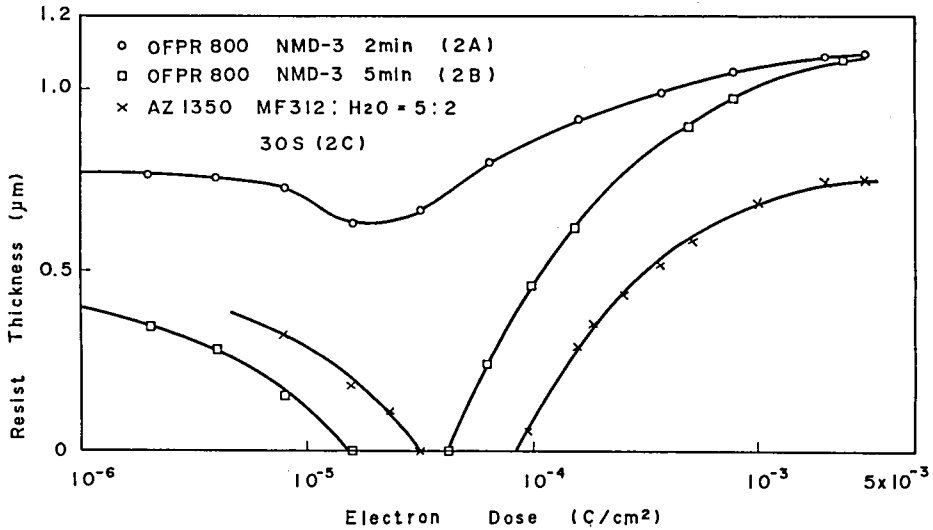


図 5.2 ジアゾレジストの感度曲線Ⅱ  
現像液NMD-3、MF312

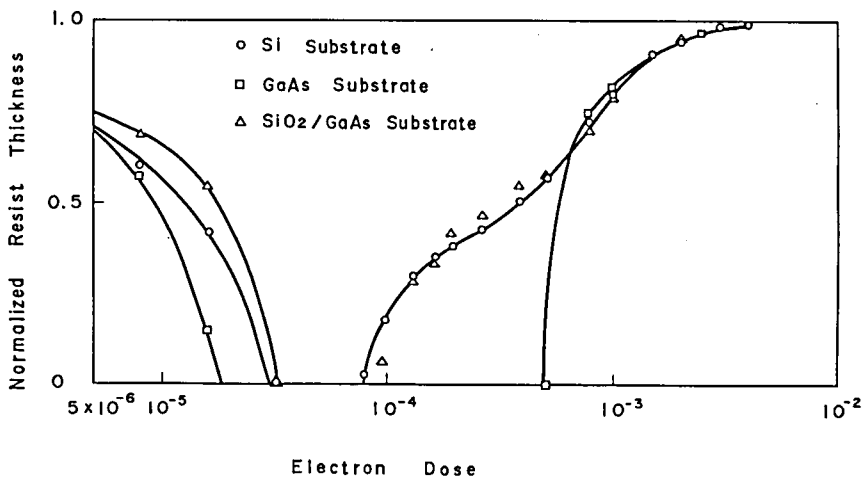


図 5.3 ジアゾレジストの感度曲線：基板依存性



間 2 分ではパター ンがぬけず、パター ンをぬくためには長時間の現像が必要であり、膜べりが非常に大きくなる。MF 312 と AZ 1350 を用いる場合も同様に膜べりが大きい。ジアゾレジストを用いて電子ビーム露光するときは、メタルフリーの現像液によりパター ンをぬくことは困難である。

図 5.3 にレジスト残膜率の基板依存性を示す。基板は Si、GaAs および厚さ 0.5  $\mu\text{m}$  の酸化膜を形成した GaAs を用いた。レジストは OFPR 800 を用い、AZ 2401 デベロッパー： $\text{H}_2\text{O}$  = 1：4 を用いて 40 秒間現像した。

酸化膜つき GaAs 基板では、ポジ形としての感度およびネガ形へ反転する露光量とも、Si 基板の場合と等しい。この結果は、基板から後方散乱して再びレジストへ入射する電子が、酸化膜層の影響を強く受けていることを示す。GaAs 基板では Si 基板に比べてポジ形としての感度は高くなる。これは、GaAs を構成する原子の原子番号が Si に比べて大きく、基板により散乱されて再びレジストに入射する電子による寄与が大きいためである<sup>8)</sup>。一方、ネガ形へ反転する露光量は GaAs 基板の場合、Si 基板より大きい。この事実は前述の考え方では説明できず、明確な解釈はできていない。

以上の結果を定量的に説明するためには、後述するモンテカルロシミュレーションとレジストの溶解特性により、レジストの膜べりを計算する方法が有効と思われる。

図 5.4 に OFPR 800 を電子ビーム露光した後、エチルアルコール溶液に 1 分間浸した場合の残膜率を示す。ジアゾレジストはプリベーク温度が 100℃ 以下の場合、エチルアルコール、アセトンなどの有機溶剤に溶解する。しかし電子ビーム露光において露光量を大きくすると、これらの有機溶剤に不溶となる。電子ビーム露光部以外のレジストはエチルアルコールに溶解するので、紫外線照射することなしにネガ形レジストとして使用できる。ただ解像度を示す  $r$  は 0.35 と低い。

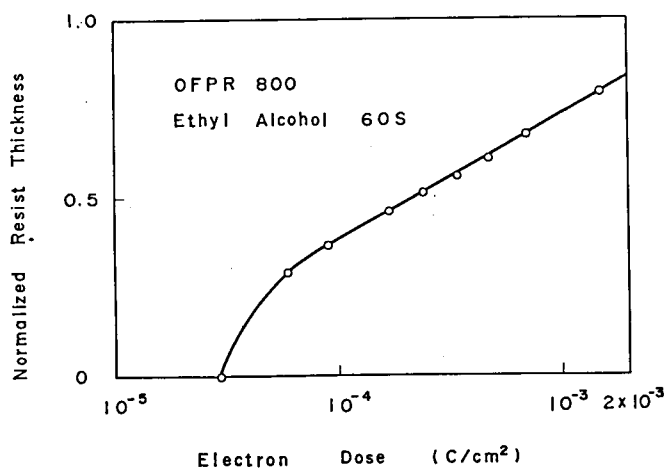


図 5.4 ジアゾレジストの感度曲線Ⅲ  
現像液 エチルアルコール

## 5.3 段差を持つ基板におけるジアゾレジストの電子ビーム露光特性

### 5.3.1 実験

平坦な基板および  $0.5\ \mu\text{m}$  の段差を持つ GaAs 基板上に OFPR800 を  $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$  の厚さに塗布して電子ビーム露光によりパターンを形成する実験を行った。現像液は AZ2401 デベロッパ - :  $\text{H}_2\text{O} = 1 : 4$  を用いた。

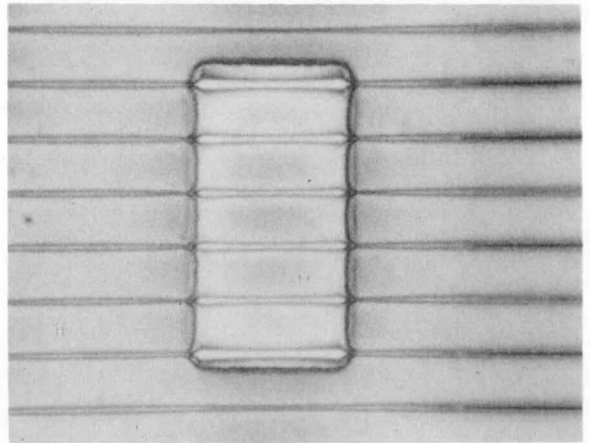
### 5.3.2 結果および検討

図 5.5 に電子ビーム露光により段差基板上レジストに形成されたパターンの顕微鏡写真を示す。(a) はレジスト膜厚  $0.5\ \mu\text{m}$ 、(b) はレジスト膜厚  $1\ \mu\text{m}$  である。露光量は  $38.4\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、露光線数 8 本、現像時間は 45 秒(a)と 75 秒(b)である。

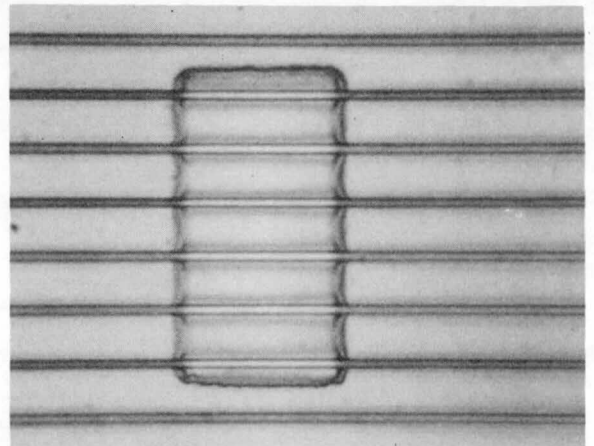
膜厚  $0.5\ \mu\text{m}$  の場合には、段差部の境界付近において線巾が太くなる。これに対してレジスト膜厚が  $1\ \mu\text{m}$  のときは、レジストのステップカバレッジは充分であり、段差境界部においても一定の線巾を保ち、しかも最小線巾として  $0.5\ \mu\text{m}$  まで形成することができる。またレジスト膜厚が  $1.5\ \mu\text{m}$  のときは、レジストのステップカバレッジは問題ないが、形成できる最小線巾が  $1\ \mu\text{m}$  以上であった。よって段差基板上にサブミクロンパターンを形成するレジスト膜厚としては  $1\ \mu\text{m}$  が最適である。

図 5.5 においては基板凸部のパターンはぬけているが、基板凹部のパターンはぬけていない。図 5.6 に、基板凹部のレジストパターンまでぬいた場合を示す。この場合、基板凸部の線巾が太くなってしまう。

以上に述べた現象は、基板凸部と基板凹部とでレジスト膜厚が異なるために生じると考えられる。基板段差部におけるレジスト形状を調べるために SEM により断面観察を行った。図 5.7 に OFPR800 塗布基板の段差部における断面 SEM 写真を示す。



(a) レジスト膜厚  $0.5\ \mu\text{m}$



(b) レジスト膜厚  $1\ \mu\text{m}$

図 5.5 基板段差によるパターン幅の変化 I

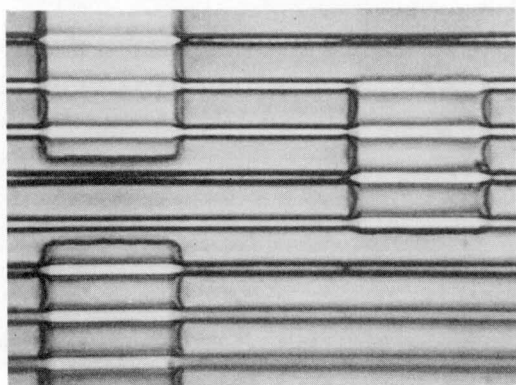


図 5.6 基板段差によるパターン幅の変化Ⅱ

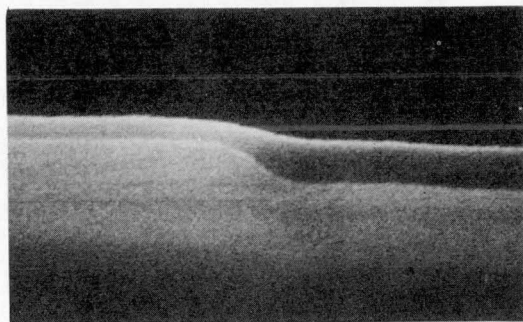


図 5.7 レジスト塗布基板の基板段差部における断面SEM写真

基板凸部のレジストの厚さが  $0.5\ \mu\text{m}$  であるのに対して、基板凹部の厚さは  $1\ \mu\text{m}$  である。また段差境界部においてレジスト膜厚は最も薄くなっており、このために図 5.5 (a)において段差境界部で線巾が太くなったと考えられる。

図 5.7 に示すように、基板凸部と基板凹部でレジスト膜厚が異なることが確認されたので、異なるレジスト膜厚に対するパターン巾と露光量、現像時間の関係を調べた。図 5.8 に平坦な基板上の 3 種類の異なる膜厚のレジストに形成されるパターン巾を現像時間に対して示す。露光量は  $32\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$  より  $64\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$  まで変化させ、露光線数 8 本の直線を描画した基板は  $\text{SiO}_2\ 0.5\ \mu\text{m}/\text{GaAs}$  である。

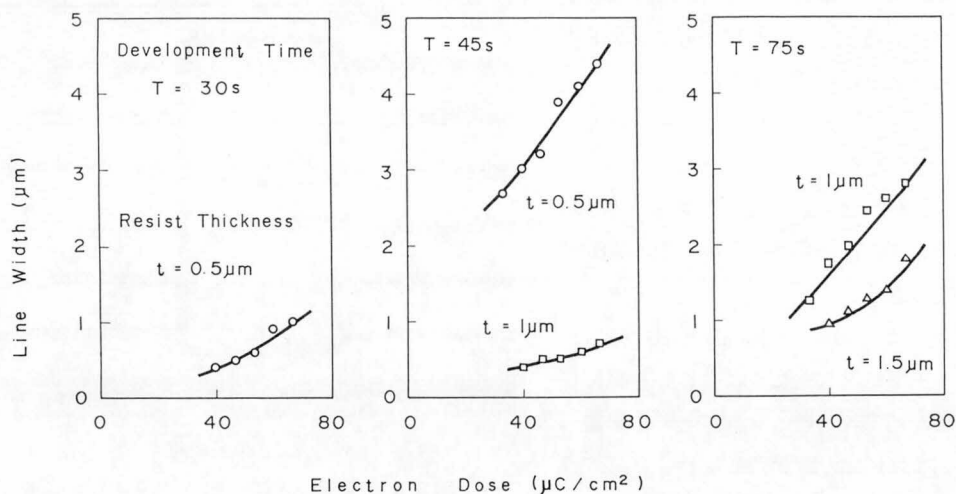


図 5.8 パターン幅とレジスト膜厚、露光量、現像時間との関係

現像時間が 30 秒の場合は、膜厚  $0.5\ \mu\text{m}$  のレジストのみパターンが形成される。現像時間 45 秒では、膜厚  $0.5\ \mu\text{m}$  のレジスト形成されるパターンは設計値より大巾に太る。一方、膜厚  $1\ \mu\text{m}$  のレジストパターンがこの現像時間で設計値どおりにできあがる。現像時間をさらに延長して 75 秒にすると、膜厚  $1.5\ \mu\text{m}$  のレジストにパターンが形成されるが、形成されるパターンの最小線巾は  $1\ \mu\text{m}$  程度である。

したがって段差のある基板上で、所定のレジストパターンを形成するためには、基板の凸凹に応じた露光量で電子ビーム露光を行う必要がある。

#### 5.4. ま と め

ジアゾレジストの電子ビーム露光特性について述べた。

アルカリ系現像液 (AZ 2401 デベロッパーなど) を用いればジアゾレジストを電子ビーム露光用レジストとして使用できることを示した。その場合、ポジ形として作用する露光量の数倍でネガ形への反転が生じる。ポジ形として作用する露光量の範囲は OFPR800 が最も狭く、AZ 1350、AZ 2400 は OFPR800 より広い。Si に比べて GaAs を基板とするほうが、ポジ形として作用する露光量範囲は広い。メタルフリーの現像液では、電子ビーム露光したジアゾレジストを現像できないことを示した。また、素子製作に用いられる段差のある基板上にレジストパターンを形成する場合は、レジスト膜厚が異なるので、基板の凹凸により露光量を変える必要があることを明らかにした。

## 参 考 文 献

- (1) B. Boryde, "Exposure of photoresists, II. electron and light exposure of a positive photoresist," J. Electrochem. Soc., vol.117, no.12, pp.1555-1556, Dec. 1970.
- (2) 小峰 孝, 中村洋一, "光露光用レジストの種類と特性" 電子材料, 10月号, pp. 40-49, 1979.
- (3) J.M. Shaw and M. Hatzakis, "Performance characteristics of diazo-type photoresists under e-beam and optical exposure," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-25, no.4, pp.425-430, April 1978.
- (4) J.M. Shaw and M. Hatzakis, "Developer temperature effects on e-beam and optically exposed positive photoresist," J. Electrochem. Soc., vol.126, no.11, pp.2026-2031, Nov. 1979.
- (5) K. Mochiji, Y. Maruyama, F. Murai, S. Okazaki, Y. Takeda, and S. Arai, "Negative patterning of AZ1350J by electron-beam desensitization of photo-sensitive compound," Japan J. Appl. Phys., vol.20, no.Supplement 20-1, pp.63-67, 1981.
- (6) W.G. Oldham and E. Hike, "A high resolution negative electron resist by image reversal," IEEE Electron Device Lett., vol.EDL-1, no.10, pp.217-219, Oct. 1980.
- (7) N. Endo, Y. Kurogi, K. Suzuki, M. Sugimoto, M. Morimoto, Y. Iida, and K. Mori, "Custom LSI process with a micron geometry, partially using electron beam direct writing," Japan J. Appl. Phys., vol.20, no.Supplement 20-1, pp.129-133, 1981.
- (8) 戸所義博, "電子ビーム露光により形成したレジスト断面形状の基板依存性," 電子通信学会論文誌, vol. J 64-C, no. 5, pp. 353-360, May 1981.
- (9) D.W. Widmann, and H. Binder, "Linewidth variations in photoresist patterns on profiled surfaces," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-22, no.7, pp.467-471, July 1975.
- (10) D.A. McGillis, and D.L. Fehrs, "Photolithographic linewidth control," ibid., vol.ED-22, no.7, pp.471-477, July 1975.
- (11) 岩崎英雄, 紫田 浩, "電子ビーム直接描画における下地段差部によるパターン変形," 第40回応用物理学会学術講演会, p 288, 1979.

- (12) 杉山尚志, 斎藤和則, 北川勝二, “電子ビーム描画用ソフトウェアによるパターン高積度化の検討,” 電子通信学会技術研究報告半導体トランジスタ研究会資料, SSD79-65, pp. 25-32, 1979.

## 第6章 電子ビーム露光により形成したレジスト断面形状

### 6.1 はじめに

電子ビーム露光は、光露光に比べてより微細なパターンを描画することが可能であるという特長を持っており、素子の微細化、高集積化が進むにつれて、電子ビーム露光によるマスク製作ならびに電子ビーム直接描画による超LSIやGaAs高周波素子の製作が広く行われつつある。

電子ビーム露光過程においては、レジスト中で散乱される電子および基板により散乱される電子の両者が、レジストを構成する高分子を分解（ポジ形レジストの場合）または架橋（ネガ形レジストの場合）する働きをする。基板により散乱された電子の軌跡は基板物質の原子番号によって大きく異なるため、電子ビームで描画され、現像によって形成されるレジストの断面形状は、基板が異なれば違った形状となることが予想される。

電子ビーム露光時にレジスト内に蓄えられる吸収エネルギーを求める方法としては、解析的な方法<sup>1)2)</sup>もあるが、モンテカルロシミュレーション<sup>3)</sup>がよく用いられている。現像後のレジスト断面形状は、モンテカルロシミュレーションにより求めた吸収エネルギー分布をレジストの溶解速度分布と関係づける<sup>4)</sup>ことにより求めることができる。

電子ビームで露光し、現像した後のレジスト断面形状のシミュレーションに関しては、幾つかの文献が発表されている<sup>5)-8)</sup>。このようなシミュレーションは、所望のレジスト断面形状を得るためあるいは近接効果補正のために利用することを最終目的としているが、そのためには実験と比較してその妥当性を確かめることが必要である。しかしながらシミュレーション結果と実験結果とを比較した報告例は少ない。露光量あるいは現像時間を変えたときのレジスト断面形状の変化についての報告がある<sup>4)9)</sup>が、いずれも基板にはSiを用いている。又、基板材料を変えた場合の散乱の影響については、レジスト内の吸収エネルギー分布の段階までの報告例<sup>10)11)</sup>はある。しかし現像により形成されたレジスト断面形状について数値計算結果と実験によって得られた結果とを対応させた詳しい報告例はない。

本章では、レジスト断面形状の基板依存性を数値計算と露光実験両面より求めた結果を報告する。基板としては電子ビーム露光が実際に適用される材料で、原子番号が比較的異なるものとしてSiとGaAsを選定した。Si基板、GaAs基板いずれの場合も、数値計算によるレジスト断面形状と実験から得られた形状とは、現像時間依存性も含めてよい一致を示した。GaAs基板の場合はSi基板に比べてGaとAsの原子番号がSiより大きいため、基板からの電子の散乱が、電子の入射点周辺に集中する傾向がより強く現われる。このため、GaAs基板においては、Si基板に比べてパターン周辺部の膜べりが大きく、より太い線幅のレジスト断面形状が得られることが判明した。

## 6.2 数 値 計 算

### 6.2.1 モンテカルロシミュレーション

入射電子によりレジスト中に蓄えられる吸収エネルギーの計算には、D. F. Kyser と K. Murata によって提案された単一散乱モデル (Single scattering model)<sup>3)</sup> によるモンテカルロシミュレーションを用いた。図 6.1 にこのモデルを示す。

このモデルでは、電子の 1 ステップの長さを、次の弾性散乱によって方向変化を受けるまでに進む距離、すなわち平均自由行程  $\Lambda$ 、

$$\Lambda = 1 / \rho N_A \sum (C_i \sigma_i / A_i) \quad (6.1)$$

にとっている。弾性散乱の微分断面積としては、電子雲によるしゃへい効果を考慮にいれたラザフォード (Rutherford) の式、

$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega} = \frac{e^4 Z_i (Z_i + 1)}{4 E^2 (1 - \cos \theta + 2 \beta_i)^2} \quad (6.2)$$

を用いる。又、エネルギー損の計算にはベーテ (Bethe) の式、

$$\frac{dE}{dS} = - \frac{2 \pi e^4 \rho N_A}{E} \sum \frac{C_i Z_i}{A_i} \ln \frac{1.166 E}{J_i} \quad (6.3)$$

が用いられる。ここで、 $\rho$  は試料の密度、 $N_A$  はアボガドロ数、 $C_i$  は重み係数、 $A_i$  は原子量、 $\sigma_i$  は全散乱断面積、 $Z_i$  は原子番号、 $\beta_i$  はスクリーニングパラメータ、 $J_i$  は平均イオン化エネルギーをそれぞれ示す。E は電子のエネルギー、 $\theta$  は散乱角、e は電子の電荷である。

モンテカルロシミュレーションによるレジスト中の吸収エネルギーの計算においては、図 6.2 に示すように、レジスト膜を 4 角柱の微小体積要素に分割して、各体積要素に蓄積される吸収エネルギーを求めた。

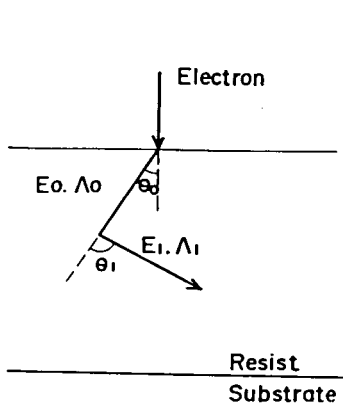


図 6.1 単一散乱モデルの説明図

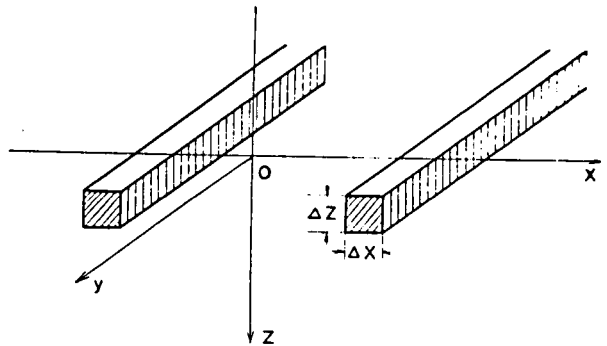


図 6.2 吸収エネルギー計算に用いる微小体積要素



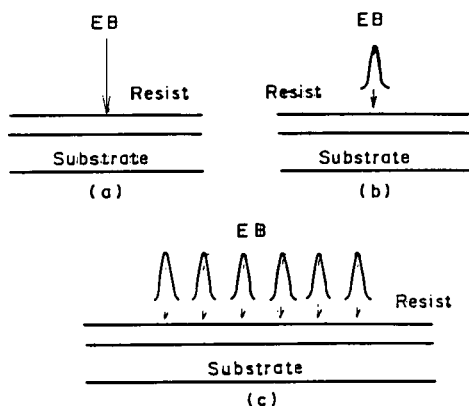


図 6.3 電子ビーム露光の説明図 (a) 広がりのない電子ビーム  
(b) (c) ガウス分布している電子ビーム

ここで入射電子ビームは図 6.3 (a) に示すように広がりを持たない線源と考へて計算している。実際には電子ビームはある広がりを持っているので、図(b)に示すようにこの広がりをガウス分布と仮定して、ガウス分布している電子ビームによる吸収エネルギー分布をたたみ込み法 (convolution)<sup>12)</sup> により求めた。このようにして得られた吸収エネルギー分布を重畳することにより、図(c)に示すように任意の線幅について吸収エネルギー分布を計算することができる。

### 6.2.2 レジスト現像のモデル

ポジ形レジストの場合は、電子ビームの照射によりレジストを構成する高分子が分解されて分子量が低下し、現像液に溶けやすくなる。レジストが現像液に溶解していく速度は、レジスト中に吸収されたエネルギーの関数であり、次の実験式で表される。<sup>4)</sup>

$$R = R_1 (C_m + D/D_0)^\alpha \quad (6.4)$$

ここで、Dはレジスト中に蓄えられた吸収エネルギー (absorbed dose)、Rは溶解速度 (solubility rate)を表す。又、 $R_1$ 、 $C_m$ 、 $D_0$ 、 $\alpha$ は実験により決定する定数であり、 $R_1 C_m^\alpha$  はレジストの膜べりを表し、 $C_m$  はレジストの初期分子量に逆比例する量である。

式 6.4 によってレジスト内の吸収エネルギー分布は溶解速度分布に変換され、現像時間の経過に伴うレジスト断面形状を追跡するセル(cell)モデル<sup>13)</sup>と組み合わせることにより、現像後のレジスト断面形状を求めることができる。

図 6.4 にセルモデルの説明図を示

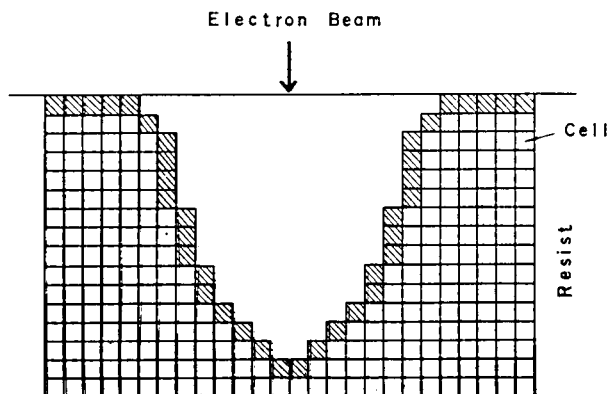


図 6.4 セルモデルの説明図

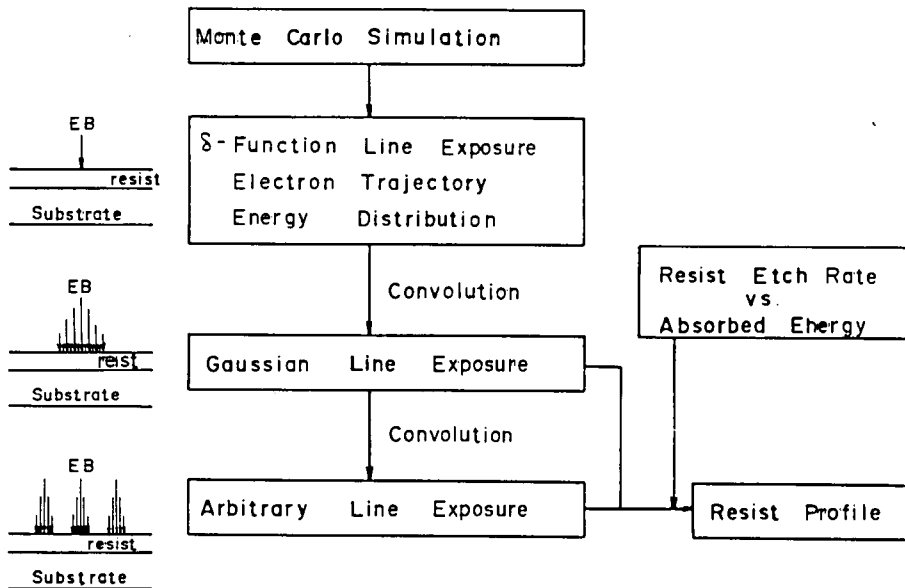


図 6.5 レジスト断面形状の計算方法

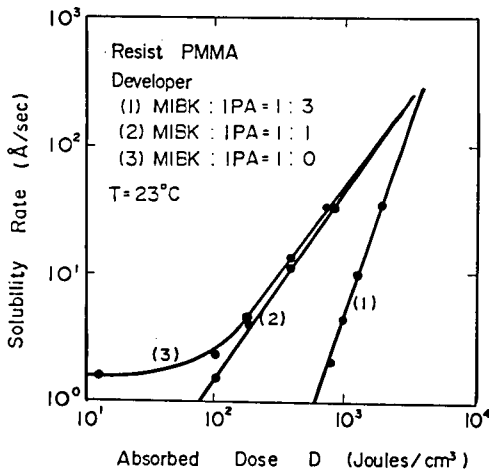


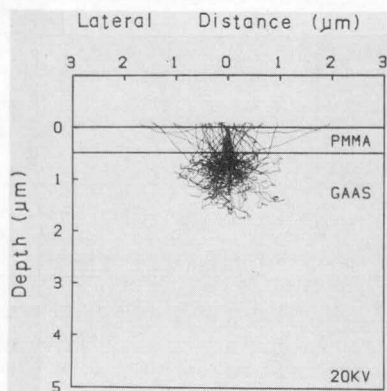
図 6.6 溶解速度—吸収エネルギー—特性

す。また、図 6.5 に 6.2.1、6.2.2 で述べた計算方法をまとめて示す。

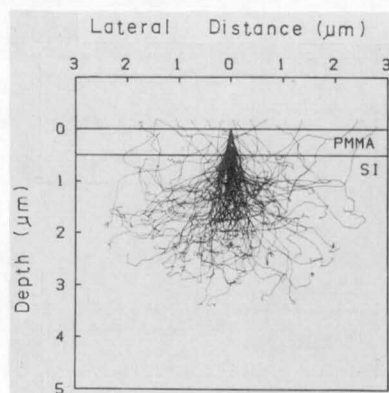
### 6.3 実 験

#### 6.3.1 レジストの溶解特性

温度 23℃ の各現像液 (MIBK: IPA = 1:0、1:1、1:3) による PMMA レジストの溶解速度—吸収エネルギー—特性を図 6.6 に示す。ここで IPA はイソプロピルアルコールを表す。現像液中の MIBK の含有率が高くなるにつれて溶解速度は大きくなる。同時に解像度が低下するとともに、未露光のレジストの溶解が生じ、膜べりが起きる。図 6.6 からカーブフィッティング法によって式 6.4 の各定数を求め、



(a) 0.5  $\mu\text{m}$  PMMA / GaAs



(b) 0.5  $\mu\text{m}$  PMMA / Si

図 6.7 PMMAレジスト中の電子の軌跡

I PAを含まないMIBK現像液に  
 対する値とし、 $R_1=1.8$ 、 $C_m=0.8$ 、  
 $D_0=200$ 、 $\alpha=1.8$ を得た。

### 6.3.2 電子ビーム露光

電子ビーム露光はスポットビーム  
 によるベクタスキャン方式露光装置  
 (日本電子製、JBX-5A型)を用  
 いて行った。加速電圧は20kV、走  
 査線数は16本/ $\mu\text{m}$ 、ビーム径は約  
 0.1  $\mu\text{m}$ とした。レジストはPMMA  
 基板にはSi及びGaAs、現像液は  
 MIBK(温度23℃)を用いた。  
 露光した1枚のスライスを分割して  
 数枚の試料を作り、各試料について  
 時間を変えて現像を行った。その後  
 レジストがついたままの試料を割り、

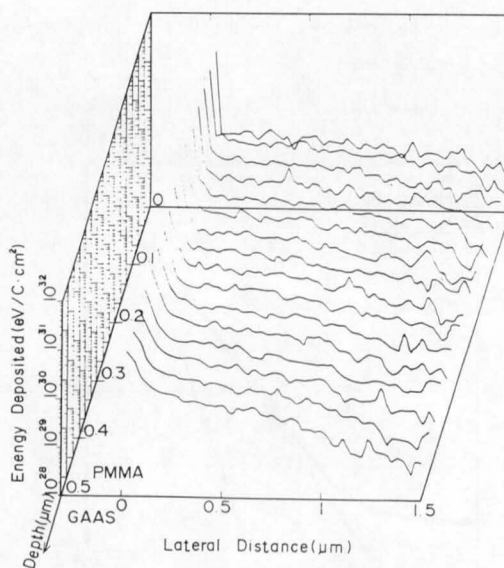


図 6.8 GaAs 基板上PMMAレジストの  
 吸収エネルギー密度分布

Au を約 200 Å の厚さに蒸着後、走査電子顕微鏡を用いて倍率  $\times 10,000 \sim \times 30,000$  でレジストの断面形状を観察した。

## 6.4 結果および考察

### 6.4.1 吸収エネルギー密度分布

GaAs 基板および Si 基板上の厚さ 0.5  $\mu\text{m}$  の PMMA レジスト中に蓄えられる吸収エネルギーの分布を求めた。はじめに図 6.3 (a) に示す広がりがない電子ビームについて計算を行った。

図 6.7 にレジスト及び基板中で散乱された電子の軌跡を電子の入射軸に平行な一平面に投影して示す。図 6.7 (a) は GaAs 基板、そして図 6.7 (b) は Si 基板の場合である。シミュレーションに用いた電子の数は 100 個、加速電圧は 20 kV である。

この図から基板の材質が異なる場合に、散乱される電子の軌跡がどのように変わるかを定性的に理解することができる。両者を比較すると、GaAs 基板においては、基板中に入った電子は入射点から約 1  $\mu\text{m}$  の範囲内しか散乱されず、又、レジスト内においても入射点の周辺約 1.5  $\mu\text{m}$  に散乱されているのに対し、Si 基板の場合は、基板中およびレジスト内において入射点より 3  $\mu\text{m}$  くらいの距離まで散乱されている。

図 6.8 に GaAs 基板の場合、レジスト中に蓄えられる吸収エネルギー密度の 2 次元的な分布を示す。電子の加速電圧は 20 kV、シミュレーションに用いた電子の数は 5,000 個、PMMA レジストの厚さは 0.5  $\mu\text{m}$  である。縦軸には吸収エネルギー密度 (energy deposited)、横軸には電子の入射点から横方向の距離 (lateral distance)、そして斜め方向にはレジスト表面からの深さをとっている。吸収エネルギー密度は、レジスト中の表面近傍では入射点で大きい値を示し、入射点より横方向に離れると急激に減少したあと緩やかに減少する。一方、レジストと基板の境界付近では、吸収エネルギー密度は、入射点より離れるにつれて緩やかに減少する。

図 6.9 に GaAs 基板および Si 基板上の PMMA レジスト中の吸収エネルギー密度分布を示す。図において  $d$  はレジスト表面から深さ方向にとった距離を表す。電子の入射点から横方向にある距離以上離れると Si 基板における吸収エネルギー密度は GaAs 基板の場合よりも大きくなる。すなわち、レジストと基板の境界付近では、入射点より約 1  $\mu\text{m}$  以上離れると吸収エネルギー密度は Si 基板のほうが大きくなる。しかし、現像後のレジスト断面形状に大きくかわる、電子の入射点周辺では、吸収エネルギー密度は、GaAs 基板のほうが Si 基板に比べて大きい。

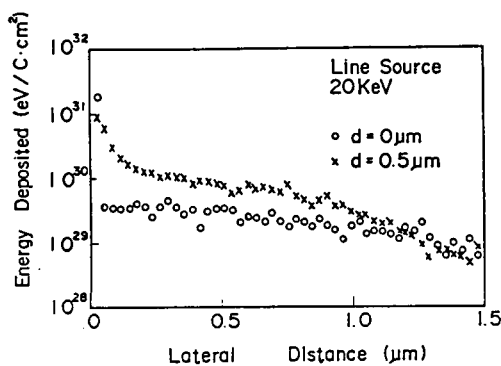
図 6.8 及び図 6.9 では、入射電子ビームに広がりがないとした場合について吸収エネルギー密度分布を示した。次に入射電子ビームに広がりがある場合について示す。直径が 0.1  $\mu\text{m}$  で電流密度がガウス分布している電子ビーム 6 本をビームの中心間隔 0.06  $\mu\text{m}$  にして、一列に並べて入射したときの PMMA レジスト中の等エネルギー密度線を図 6.10 に示す。図 6.9 において得られた結果と同様に、GaAs 基板中ではレジスト中に蓄えられる吸収エネルギーの密度は Si 基板に比較して大きい。

### 6.4.2 レジスト断面形状

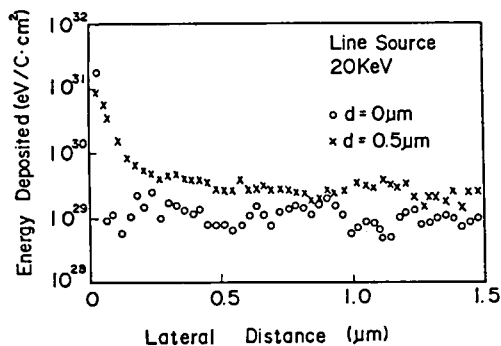
露光、現像後のレジスト断面形状の数値計算結果と実験結果とを図 6.11、図 6.12 に示す。図 6.11 は

GaAs基板、図6.12はSi基板の場合である。露光条件は、露光量  $64 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、ビーム径  $0.1 \mu\text{m}$ 、走査線間隔  $0.06 \mu\text{m}$ 、走査線数6本である。現像時間は1、2、3、4分とした。GaAs基板の場合、数値計算によると、現像時間1分ではレジストの途中まで現像され、2分で基板まで到達する。3分、4分と現像時間が増大するにつれてパターン周辺の膜べりが大きくなり、線幅が広がっていく。実験で得られた、各現像時間におけるレジスト断面のSEM写真は、数値計算結果と非常によく一致している。現像時間の増大に伴うレジストの膜べりと線幅の増大の様子がよい一致を示す。

一方、Si基板についての数値計算結果によると、現像時間が1分および2分では、レジストは基板面までは現像されない。3分で基板面まで現像され、4分でレジスト壁面がほぼ垂直となる。計算によるレジスト断面とSEM写真とを比較すると、

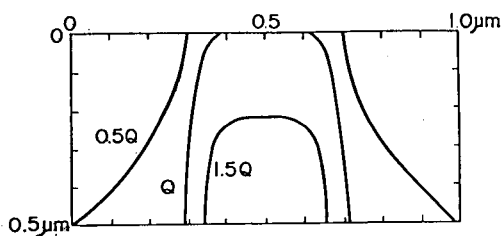


(a)  $0.5 \mu\text{m}$  PMMA / GaAs

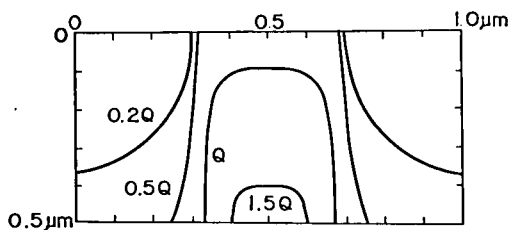


(b)  $0.5 \mu\text{m}$  PMMA / Si

図6.9 PMMAレジスト中の吸収エネルギー密度分布



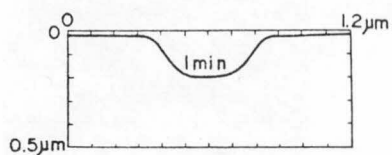
(a)  $0.5 \mu\text{m}$  PMMA / GaAs



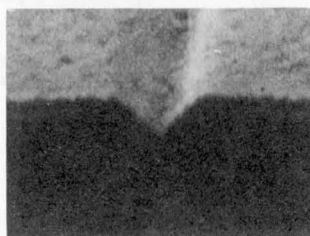
(b)  $0.5 \mu\text{m}$  PMMA / Si

図6.10 PMMAレジスト中の等エネルギー密度線

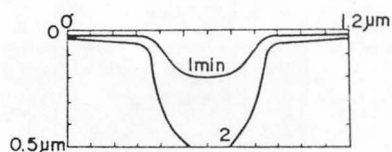
$Q = 10^{31} \text{eV}/\text{C} \cdot \text{cm}^2$ ,  $l = 6$ 、走査線間隔  $0.06 \mu\text{m}$ 、ビーム径  $0.1 \mu\text{m}$



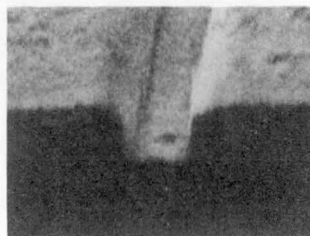
(a)  $T = 1 \text{ min}$



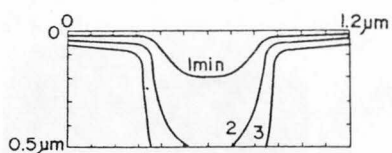
(a) 現像時間 1 分



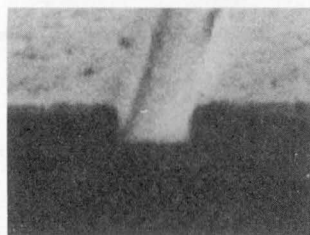
(b)  $T = 2 \text{ min}$



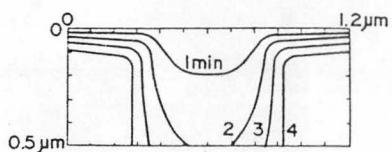
(b) 2 分



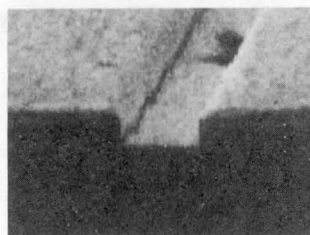
(c)  $T = 3 \text{ min}$



(c) 3 分



(d)  $T = 4 \text{ min}$



(d) 4 分

図 6.11 GaAs 基板上 PMMA レジストの露光、現像後の断面形状

線幅が細いこと、膜べりが小さいことに関してはほぼ一致していることがわかる。

しかし、Si 基板における実験結果では、レジストの肩の部分がだれており、この点は計算結果と異なっている。この肩だれは文献(9)においても指摘されている。GaAs 基板の場合には肩だれは Si 基板の場合ほど目立たない。その理由は、レジストの膜べりが大きく、そのために肩だれ現象が判別しにくくなるからである。

計算によって求められたレジスト断面形状と実験でえられる形状とは肩だれを除いてはよく一致してい

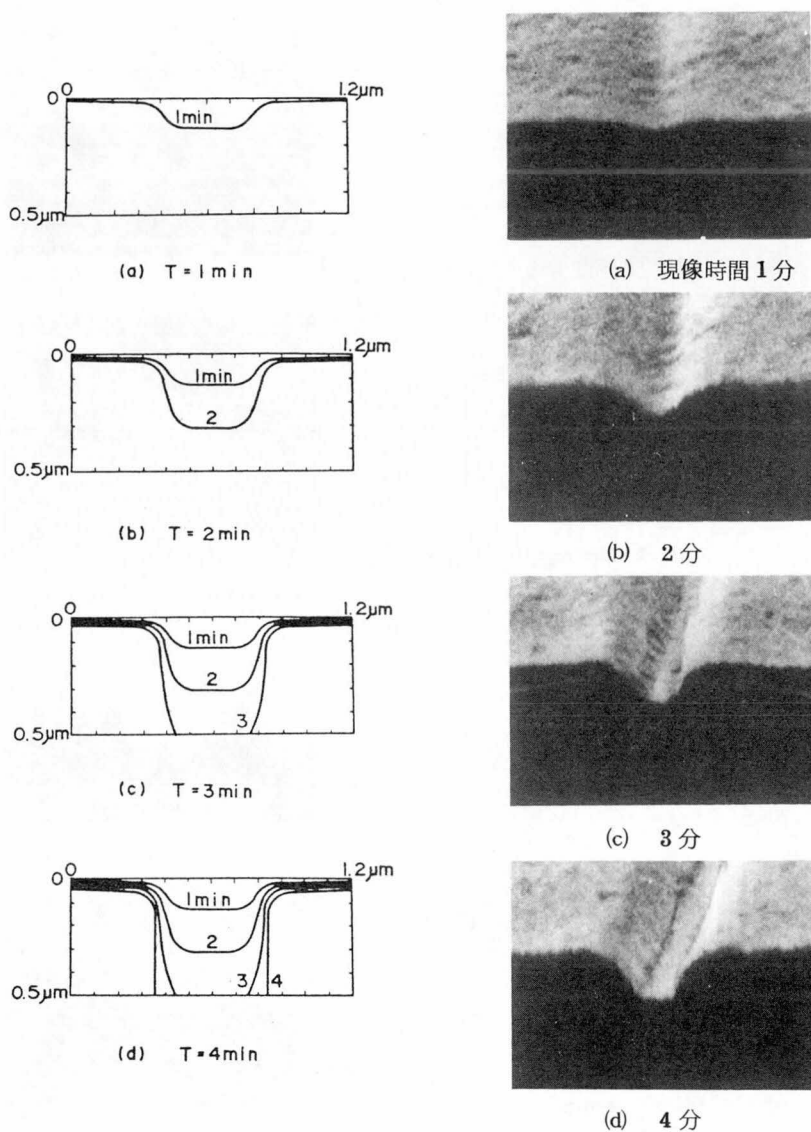


図 6.12 Si 基板上 PMMA レジストの露光、現像後の断面形状

る。数値計算結果と実験結果のレジスト断面形状を完全に一致させるという意味で、この肩だれ現象は残された課題である。

## 6.5 ま と め

電子ビーム露光、現像後のレジスト断面形状の基板依存性を数値計算により求めて実験結果と比較した。基板としては、Si 及び GaAs を使い、レジストは PMMA を用いた。

数値計算により求めたレジスト断面形状は、実験により得られた結果と、各現像時間において定量的によく一致した。原子番号の大きい材料で構成された基板 (GaAs) を用いると原子番号の小さい材料で構成された基板 (Si) に比べてレジスト中に蓄えられる吸収エネルギーの密度はより大きくなる。GaAs 基板上のレジスト断面形状は、Si 基板に比べて同じ露光量、現像時間では、線幅は広く、パターン周辺部の膜べりは大きい。

GaAs 基板と Si 基板では、基板を構成する材料の原子番号が異なり、電子の散乱の様子が異なっているが、モンテカルロシミュレーションとレジスト現象のモデルを用いて計算したレジスト断面形状は、両基板とも実験結果とおおむねよく一致している。この事実は所望の基板上的レジスト断面形状を数値計算により予測できることを意味している。しかし、用いる基板によっては、数値計算に比べて実際のレジスト断面形状の肩だれが大きい場合があるので注意する必要がある。



## 参 考 文 献

- (1) R.J. Hawryluk and H.I. Smith, "Electron beam exposure profiles in thin polymer films", in Proc. 5th Int. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology, Electrochemical Society, pp.51-67, 1972.
- (2) J.S. Greeneich, and T. Van Duzer, "An exposure model for electron sensitive resists", IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-21, no.5, pp.286-299, May 1974.
- (3) D.F. Kyser and K. Murata, "Monte Carlo simulation of electron beam scattering and energy loss in thin films on thick substrates", in Proc. 6th Int. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology, Electrochemical Society, pp.205-223, 1974.
- (4) A.R. Neureuther, D.F. Kyser and C.H. Ting, "Electron-beam resist edge profile simulation", IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.686-693, April 1979.
- (5) D.F. Kyser and N.S. Viswanathan, "Monte Carlo simulation of spatially distributed beams in electron-beam lithography", J. Vac. Sci. & Technol., vol.12, no.6, pp.1305-1308, Nov./Dec. 1975.
- (6) N.S. Viswanathan, R. Pyle and D.F. Kyser, "Simulation of lithographic images in electron beam technology", in Proc. 7th Int. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology, Electrochemical Society, pp.218-232, 1976.
- (7) J.S. Greeneich, "Time evolution of developed contours in PMMA electron resist", J. Appl. Phys., vol.45, no.12, pp.5264-5268, Dec. 1974.
- (8) M. Hatzakis, C.H. Ting and N.S. Viswanathan, "Fundamental aspects of electron beam exposure of polymer resist systems", in Proc. 6th Int. Conf. on Electron and Ion Beam Science and Technology, Electrochemical Society, pp.542-579, 1974.
- (9) K. Murata, E. Nomura, K. Nagami, T. Kato and H. Nakata, "Experimental and theoretical study of cross-sectional profiles of resist patterns in electron-beam lithography", J. Vac. Sci. & Technol., vol.16, no.6, pp.1734-1738, Nov./Dec. 1979.

- (10) N. Aizaki, "Proximity effect dependence on substrate material", *ibid.*, pp.1726-1733.
- (11) T. Kato, T. Yahara, H. Nakata, K. Murata and K. Nagami, "Electron-beam exposure profiles in polymer films for metallic film mask fabrication", *J. Vac. Sci. & Technol.*, vol.15, no.3, pp.934-937, May/June 1978.
- (12) T.H. Chang, "Proximity effect in electron-beam lithography", *J. Vac. Sci. & Technol.*, vol.12, no.6, pp.1271-1275, Nov./Dec. 1975.
- (13) F.H. Dill, A.R. Neureuther, J.A. Tuttle and E.J. Walker, "Modeling projection printing of positive photoresist", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.ED-22, no.7, pp.456-464, July 1975.

## 第7章 近接効果補正

### 7.1 はじめに

電子ビームを用いて微細パターンを描画する場合、パターンが微細化するほど第6章で述べた電子ビームの散乱の効果が重要な問題となる。基板上のレジスト薄膜に入射した電子ビームは、レジスト内で散乱を受けるとともに、基板中で後方散乱されるので、電子ビームが入射した位置だけではなく、その周辺に電荷が蓄積される。このために、描画したパターンの形状や寸法が著しく入力設計値と異なる、近接効果と呼ばれる現象が発生する<sup>1)</sup>。したがって電子ビーム露光を用いて微細なパターンを精度よく描画するためには、近接効果の影響を補正する必要がある。

近接効果補正を行うためには、まずある位置に入射した電子ビームが他の位置にどのような影響を与えるかを知る必要がある。図7.1に示すように、点Qに入射した電子ビームによる点Qより距離 $r$ 離れた点Pでの照射量は、 $r$ とともに減少する関数であり、E I D (exposure intensity distribution) 関数と呼ばれる。

E I D関数は実験的に求められており、

$$F(r) = C_f \exp \left\{ -\left(\frac{r}{\beta_f}\right)^2 \right\} + C_b \exp \left\{ -\left(\frac{r}{\beta_b}\right)^2 \right\} \quad (7.1)$$

で表わされる<sup>1)</sup>。ここで第1項は前方散乱電子による寄与を、第2項は後方散乱電子による寄与を表わす。このE I D関数を用いて図7.2に示すように、任意の点Pが周囲の電子ビーム露光された領域A、B、C、Dから受ける露光量を求めることができる。ここで実験により求められた式7.1の係数の値は実験条件に

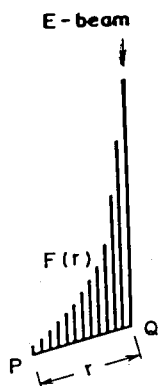


図7.1 近接効果の説明図 I

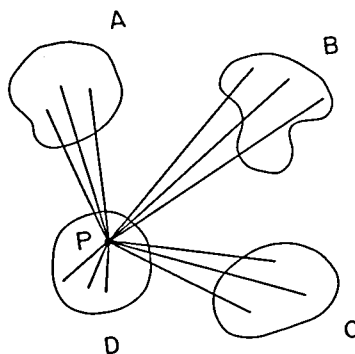


図7.2 近接効果の説明図 II

より変動するので、報告者の間でかなり異なっている<sup>1) - 3)</sup>。

これに対して、E I D関数は第6章で述べたモンテカルロシミュレーションで求めることができ、著者をも含め、その結果が報告されている<sup>4) - 7)</sup>。しかし、モンテカルロシミュレーションで求めた、そのままのE I D関数は、実際に計算する上で非常に不便なので、この関数を式7.1で近似することにより、その係数が求める方法がある<sup>8)</sup>。

このようなE I D関数を用いることにより、各図形の露光強度を計算して近接効果補正が行われており、SPECTRE<sup>9)</sup>、AMDES<sup>10)</sup>などの補正方法がある。しかし、パターン数の多いLSI、超LSIを描画する際に、各図形の露光強度を逐一計算することは、不可能に近い。より実用的な方法としてあらかじめパターンごとに補正量を決めておく方法が提案されている<sup>11)</sup>。

本章では、近接効果と露光条件との関係、モンテカルロシミュレーションを用いたE I D関数の決定、それを用いた露光強度の計算およびパターンの近接効果補正について述べる。

## 7.2 近接効果と露光条件

近接効果は、加速電圧、ビーム径およびビーム形状、パターンの寸法および形状、ビームの走査間隔、レジストの種類と膜厚、現像条件、基板の種類と膜厚などにより異なる。

図7.3に加速電圧、レジスト膜厚、基板を変えて電子の散乱の軌跡をシミュレーションした結果を示す。

(a)～(f)はそれぞれ、

- (a) 加速電圧 10 kV PMMA 0.5  $\mu\text{m}$  / Si 基板
- (b) 加速電圧 20 kV PMMA 0.5  $\mu\text{m}$  / Si 基板
- (c) 加速電圧 10 kV PMMA 1  $\mu\text{m}$  / Si 基板
- (d) 加速電圧 20 kV PMMA 1  $\mu\text{m}$  / Si 基板
- (e) 加速電圧 20 kV PMMA 0.5  $\mu\text{m}$  / GaAs基板
- (f) 加速電圧 20 kV PMMA 1  $\mu\text{m}$  / GaAs基板

を表わす。レジストが厚いほどレジスト内での散乱は大きく、加速電圧が低いほどレジスト内で大きく散乱される。また、第6章で述べたように、基板を構成する物質の原子番号が大きいほど、基板からの後方散乱は電子の入射点周辺に集中する。したがって、近接効果は加速電圧が低いほど、レジスト膜厚が厚いほど、基板を構成する物質の原子番号が大きいほど、大きくなる。

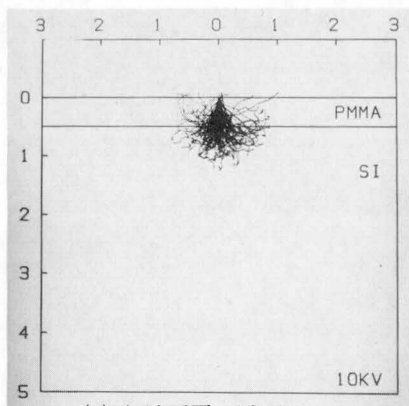
## 7.3 露光強度の計算

### 7.3.1 E I D関数

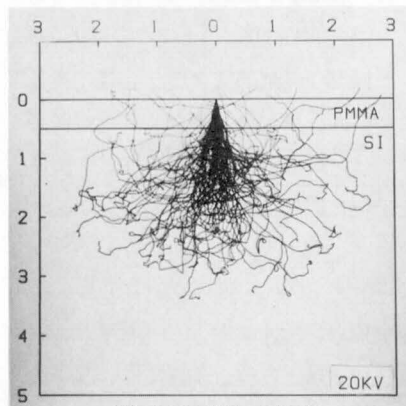
E I D関数を求めるために、モンテカルロシミュレーションによりレジスト中に蓄積される吸収エネルギー分布を求めた。図7.4に拡がりのない電子ビームについて、加速電圧20kV、PMMA 0.5 $\mu\text{m}$  / Siの条件で計算した結果を示す。レジスト表面と基板に近いレジスト中では吸収されるエネルギーが異なるわけであるが、ここでは基板と接するレジスト中に蓄積される吸収エネルギーを求めた。

この数値計算結果を、式7.1で表わされる2つのガウス分布の和で近似して、 $C_f$ 、 $C_b$ 、 $\beta_f$ 、 $\beta_b$ を求めた。その方法としては、重みつき最小二乗法を用いて、

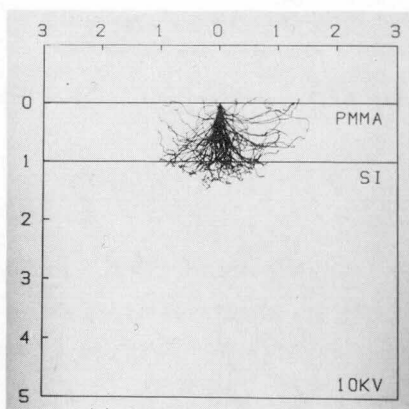
$$G(C_f, C_b, \beta_f, \beta_b) = \sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \frac{F(r_i)}{f_i} \right\} \quad (7.2)$$



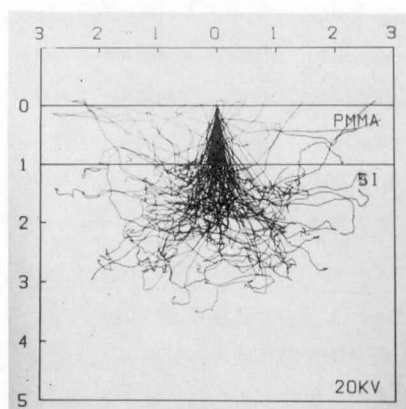
(a) 加速電圧 10kV  
PMMA  $0.5\mu\text{m}/\text{Si}$



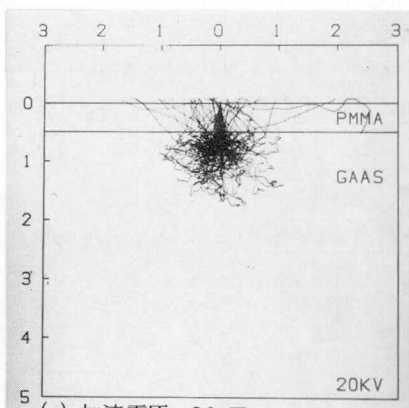
(b) 加速電圧 20kV  
PMMA  $0.5\mu\text{m}/\text{Si}$



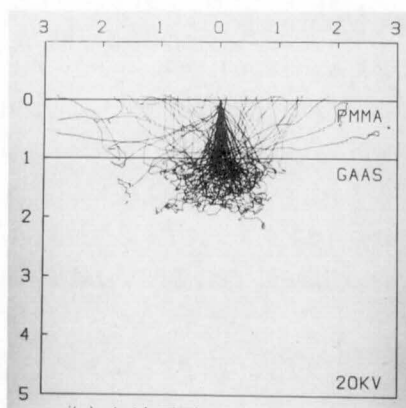
(c) 加速電圧 10kV  
PMMA  $1\mu\text{m}/\text{Si}$



(d) 加速電圧 20kV  
PMMA  $1\mu\text{m}/\text{Si}$



(e) 加速電圧 20kV  
PMMA  $0.5\mu\text{m}/\text{GaAs}$



(f) 加速電圧 20kV  
PMMA  $1\mu\text{m}/\text{GaAs}$

図 7.3 レジストおよび基板中における電子の軌跡

が最小となるように、 $C_f$ 、 $C_b$ 、 $\beta_f$ 、 $\beta_b$ を決定した。 $C_f = 5.9 \times 10^{30}$ 、 $C_b = 4.2 \times 10^{29}$ 、 $\beta_f = 0.09$ 、 $\beta_b = 1.2$ の値が得られ、式7.1に代入した結果を図7.4の実線に示す。

### 7.3.2 露光強度の計算方法

図7.2に示す、任意の点Pの露光強度は、Pが含まれる図形Dからの寄与と周囲の図形A、B、Cからの寄与として表われ、前者を図形内近接効果、後者を図形外近接効果と呼ぶ。Pにおける露光強度をIとすると、

$$I = \iint F(r) dx dy \quad (7.3)$$

で表われ、露光強度の計算は二重積分を解く問題に帰着する。

二重積分の数値計算は、時間がかかるので式7.3を単積分に変換して計算を行う。

単積分へは、誤差関数を用いる方法および極座標による積分の2方法がある<sup>3)</sup>。しかし、図7.5に示すような矩形の場合は、露光強度は簡単に計算できる次式で表わすことができる<sup>12)</sup>。

$$I = C_f \{ \text{erf}(x_2, \beta_f) - \text{erf}(x_1, \beta_f) \} \{ \text{erf}(y_2, \beta_f) - \text{erf}(y_1, \beta_f) \} \\ + C_b \{ \text{erf}(x_2, \beta_b) - \text{erf}(x_1, \beta_b) \} \{ \text{erf}(y_2, \beta_b) - \text{erf}(y_1, \beta_b) \} \quad (7.4)$$

ここで

$$\text{erf}(x, \beta) = \int_0^x \exp \{ - (t/\beta)^2 \} dt \quad (7.5)$$

式7.4より任意の矩形についてその露光強度を計算することができ、また台形、三角形についても矩形に分割することにより計算可能となる。

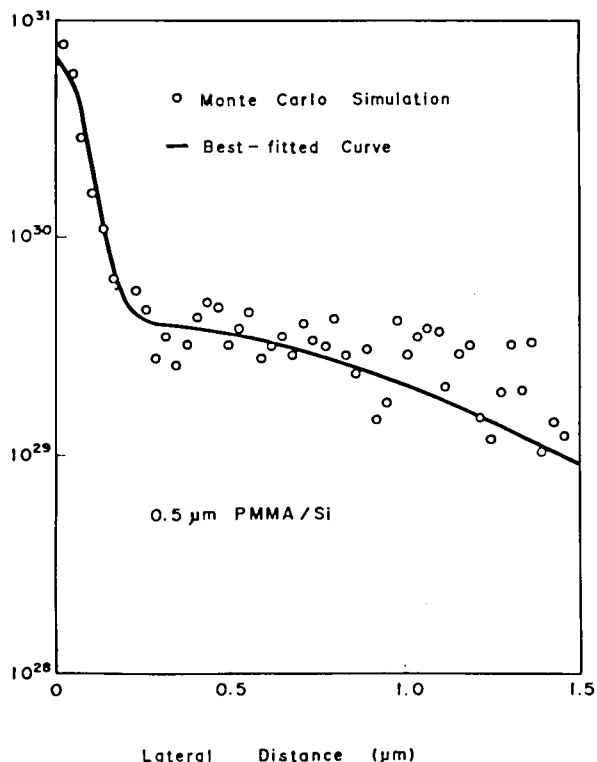


図7.4 レジスト中に蓄積される吸収エネルギー分布

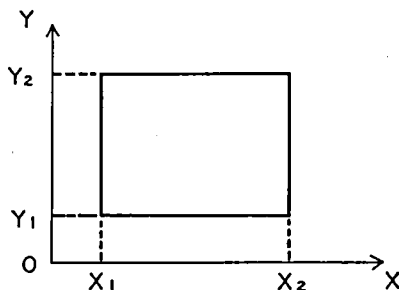


図7.5 露光強度計算の説明図

#### 7.4 近接効果補正

図形内近接効果の例として、図 7.6 に設計値が  $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$  の直線および正方形について式 7.1、式 7.4 を用いて露光強度分布を計算して示す。2 けたの数字がその位置における相対的な露光強度を表わしており、露光強度が表示される位置は  $0.1\ \mu\text{m}$  間隔である。

ここで限界しきい値露光強度  $I_{th}$  を導入して、露光強度  $I$  が  $I_{th}$  をこえるレジスト部分が溶解（または残存）すると考える。その場合、設計値  $1\ \mu\text{m}$  の正方形の一边が  $1\ \mu\text{m}$  となるときの、設計値  $0.5\ \mu\text{m}$  の正方形の一边は  $0.5\ \mu\text{m}$  より小さくなる。

この近接効果を補正する方法としては、

- (a) 露光量を図形により変更する。
- (b) 図形の拡大、縮小を行う。

が考えられ、両者を併用することもできる。

図 7.6 の正方形については、一边が小さくなるほど、実際のパターン幅が減少するとともに、パターン形状が円に近くなる。(a)、(b)の方法では  $0.5\ \mu\text{m}$  以下の正方形については補正することが難しく、別の方法、補正点ビーム照射方式が提案されている<sup>13)</sup>。

図 7.7 に正方形および直線の露光量を、辺の中点について計算した結果を示す。各パターンを設計値どおりに描画するためには、正方形の一边または、線分の辺上の露光強度が一定となるように、各パターンの露光量を変えればよい。たとえば一边が  $1\ \mu\text{m}$  の正方形は、 $5\ \mu\text{m}$  幅の直線に比べて、倍の露光量が必要となる。なお、この場合、正方形のコーナが円くなるのを補正することはできない。

ここでは、露光量を図形により変更する補正方法について述べたが、図形の拡大、縮小で補正することも可能である。その場合は、図 7.6 に示した露光強度分布を求めることにより、各パターンごとの設計値入力を決定する。

上に述べた方法により、各パターンごとに補正量を決めておくことにより、図形内近接効果の補正をすることができる。図形外近接効果については、現状のパターンルールでは問題になることは少ない。しかし、パターンルールが微細化すると、図形外近接効果についても補正する必要がある。その場合、各パターンごとに補正量を計算することは、計算時間の点で難しいので、あらかじめ、図形外近接効果についても、ランクわけを行うことが考えられる。しかし、実際のパターンとランクわけしたパターン例との照合、ランクわけの方法などの問題が今後に残されている。

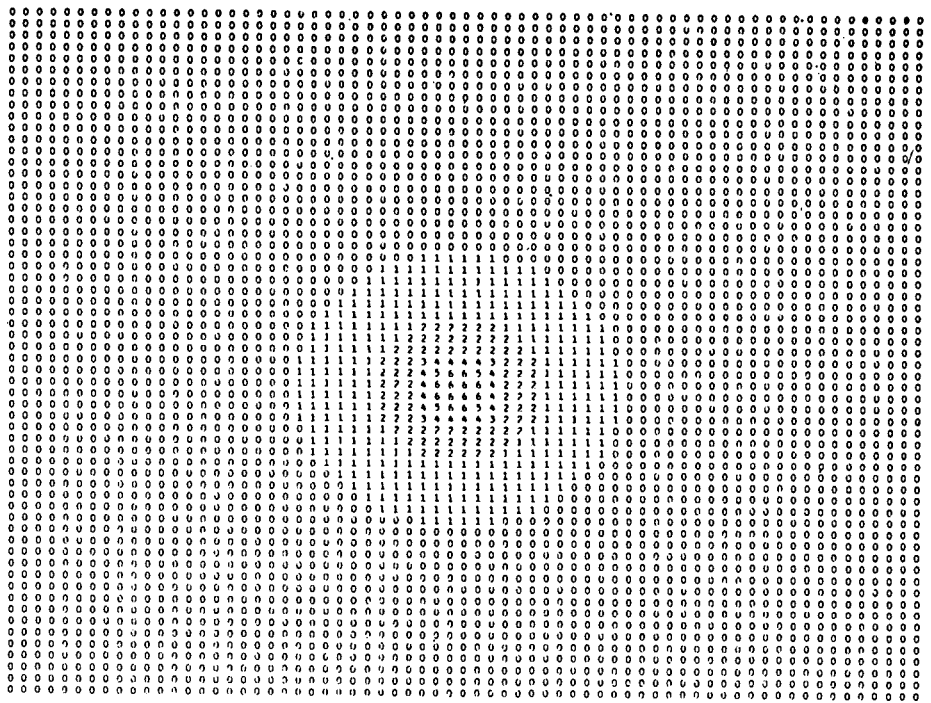


図 7.6 露光強度分布の計算例 (a)  $0.5 \mu\text{m}$  口正方形

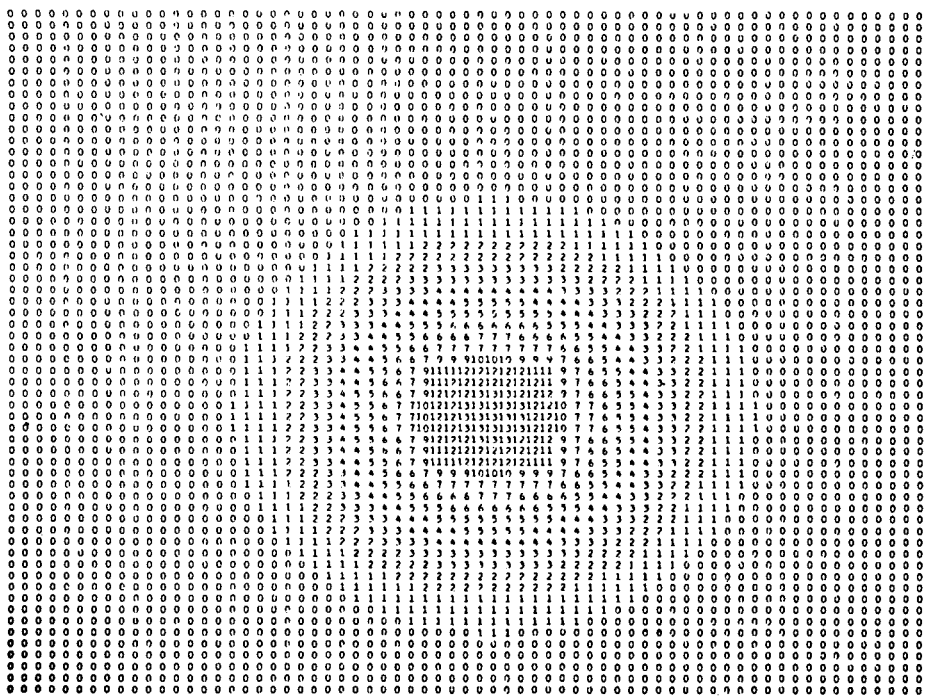
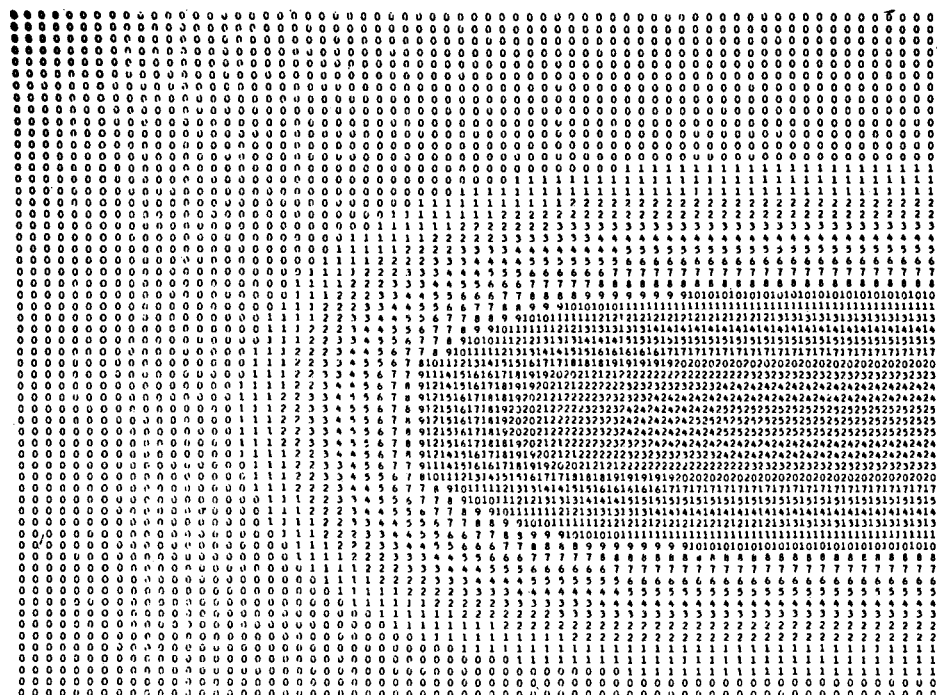
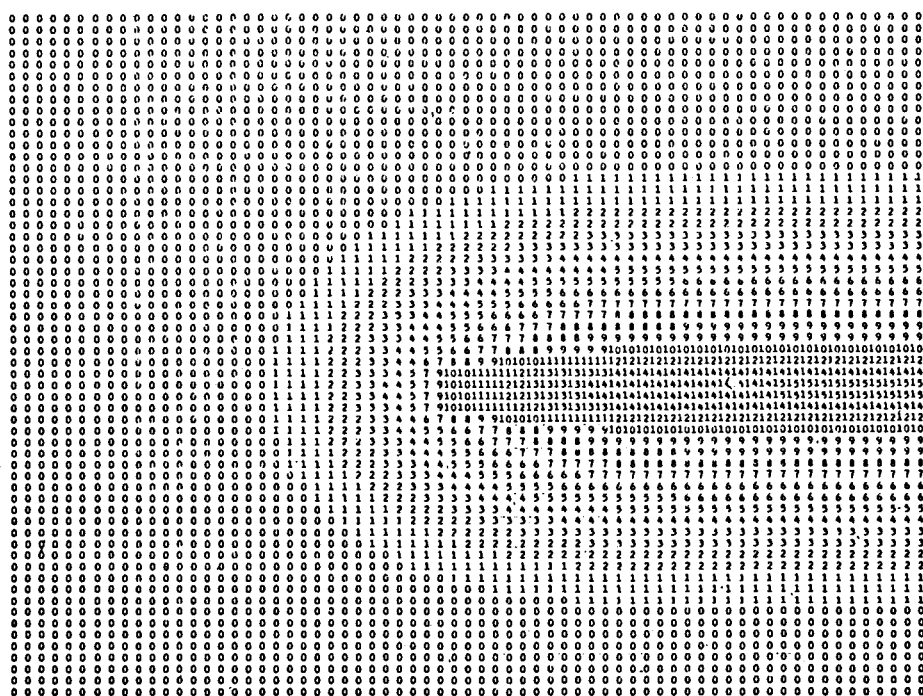


図 7.6 露光強度分布の計算例 (b)  $1 \mu\text{m}$  口正方形





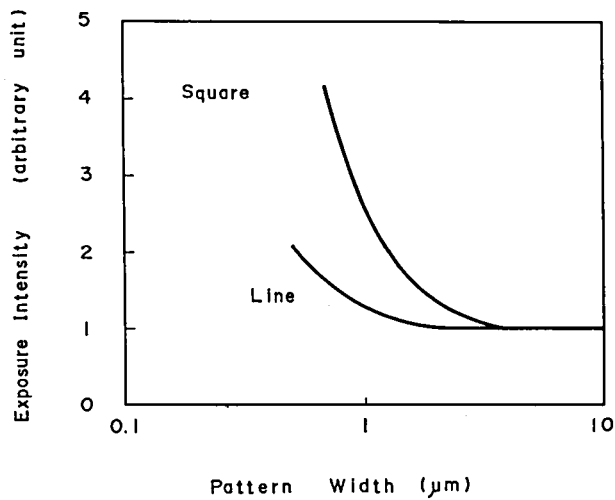


図 7.7 正方形、直線における露光強度

## 7.5 ま と め

電子ビーム露光における近接効果補正について述べた。

シミュレーションにより電子の軌跡を求め、近接効果と、加速電圧、レジスト膜厚、基板との関係を定性的に明らかにした。

つぎに、シミュレーションを用いてEID関数を求め、各図形の露光強度を計算することにより、図形内近接効果の補正量を得た。図形外近接効果についても同様にして計算することができるが、実際のパターンに適用するには、計算時間の点で難しく、実用的な補正方法を開発する必要がある。

## 参 考 文 献

- (1) T.H.P. Chang, "Proximity effect in electron-beam lithography," J. Vac. Sci. Technol., vol.12, no.6, pp.1271-1275, Nov./Dec. 1975.
- (2) W.D. Grobman and A.J. Speth, "An exposure wedge for electron beam lithography development control and for the determination of resist development and proximity parameters," Proceedings of the 8th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, Seattle, WA, 1978, p.276.
- (3) 杉山尚志, 斎藤和則, 清水京造, 垂井康夫, "電子ビーム描画における近接効果補正," 電子通信学会論文誌 (C), vol. 62-C, no. 10, pp. 668-675, Oct. 1979.
- (4) J.S. Greeneich and T. Van Duzer, "An exposure model for electron-sensitive resists," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-21, no.5, pp.286-299, May 1974.
- (5) R.J. Hawryluk, H.I. Smith, A. Soares, and A.M. Hawryluk, "Energy dissipation in a thin polymer film by electron beam scattering experiment," J. Appl. Phys., vol.46, no.6, pp. 2528-2537, June 1975.
- (6) D.F. Kyser and K. Murata, "Monte Carlo simulation of electron beam scattering and energy loss in thin films," Proceedings of the 6th International Conference on Electron and Ion Beam Science and Technology, San Francisco, CA, 1974, pp.205-223.
- (7) 戸所義博, "電子ビーム露光により形成したレジスト断面形状の基板依存性," 電子通信学会論文誌, vol. J 64-C, no. 5, pp. 353-360, May 1981.
- (8) M. Parikh and D.F. Kyser, "Energy deposition functions in electron resist films on substrates," J. Appl. Phys., vol. 50, no.2, pp.1104-1111, Feb. 1979.
- (9) M. Parikh, "Self-consistent proximity effect correction technique for resist exposure (SPECTRE)," J. Vac. Sci. Technol., vol.15, no.3, pp.931-933, May/June 1978.
- (10) N. Sugiyama, K. Saitoh, K. Shimizu, and Y. Tarui, "Advanced electron beam lithography-software system AMDES," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-17, no.8, pp.1466-1474, Aug. 1980.

- (11) 大紫 央, 龍野剛一, 藤波明平, 青山真二, 小池光雄, 竹内辰男, “電子ビーム露光におけるパターン寸法制御,” 電子通信学会技術研究報告, 半導体トランジスタ研究会, SSD80-70, pp. 9-15, 1980.
- (12) 菊池 敦, 金丸暁夫, 岡崎信道, 中根靖章, “電子ビーム描画技術における露光強度の高速計算法及びパターン補正法,” 電子通信学会技術研究報告, 半導体トランジスタ研究会, SSD 78-62, pp. 11-17, 1978.
- (13) 斎藤和則, 杉山尚志, “電子ビーム描画における図形内近接効果補正,” 電子通信学会全国大会予稿集, 第2分冊, p. 214, 1979.

## 第 8 章 リフトオフ技術

### 8.1 はじめに

リフトオフ法<sup>1)</sup>はドライエッチング<sup>2)</sup>とともに、微細パターンを形成するために用いられる重要な技術である。図 8.1 にドライ

エッチングを用いるリソグラフィの主要工程を、図 8.2 にリフトオフ法を用いるリソグラフィの主要工程を示す。ドライエッチングにおいては、現像後のレジスト膜を保護被膜として基板のエッチングが行われる。リフトオフ法は、レジスト膜をマスクとして金属蒸着を行った後、レジスト上の金属蒸着膜をレジストとともに除去して、基板上に蒸着金属パターンを形成する方法である。

ドライエッチングはエッチングされる材料に応じたプロセスの開発が必要であり、マスクとなる材料との選択比、基板との選択比、エッチングの異方性などが重要な要素となる<sup>2)</sup>。一方、リフトオフの場合は、比較的いろいろな材料で微細パターンを形成することができ、特にサブミクロンの金属電極の形成に応用されている<sup>3)-7)</sup>。

この場合、問題となるのは、露光、現像後のレジストの断面形状である。リフトオフを確実に成功させるためには、レジスト断面形状において、レジストが除去された部分の幅を上部より低部のほうが広い、いわゆるアンダーカット形状(図 8.2 参照)にする必要がある<sup>1)</sup>。

電子ビーム露光を用いる場合は、第 6 章で述べたよ

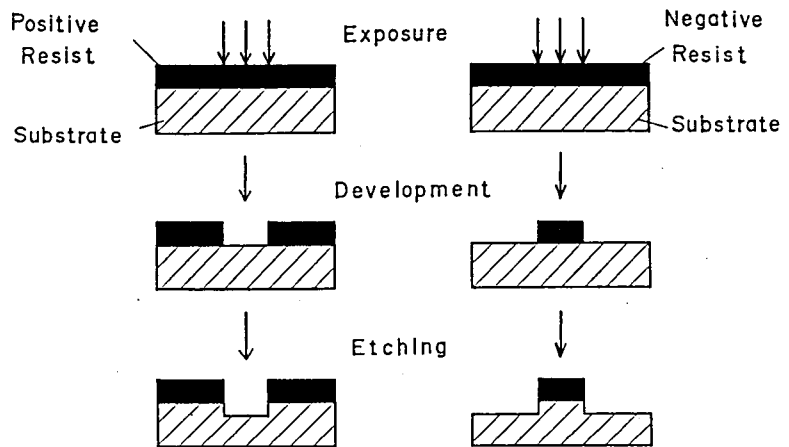


図 8.1 ドライエッチングの主要工程

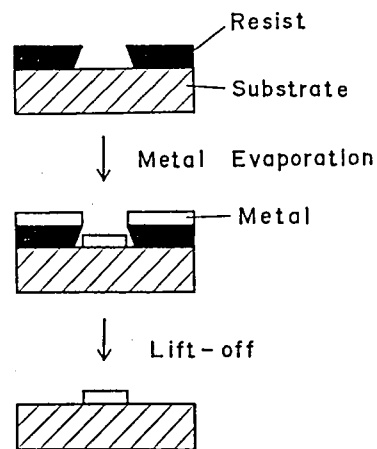


図 8.2 リフトオフ法の主要工程

うに、電子はレジストおよび基板中で散乱を受けるので、露光量と現像条件を適切に制御することによってアンダーカット形状を形成することができる<sup>8)</sup>。しかし、電子ビーム露光により形成するレジストパターンは露光量および現像条件に大きく依存する。より確実にレジストのアンダーカット形状を形成する方法として、著者およびIBMのグループにより提案された二重レジスト法（低感度レジスト／高感度レジスト）<sup>9) - 11)</sup>がある。この方法は、基板の凹凸を第一層のレジストが平滑にするので、微細パターンの形成に適した方法である。また、二重レジストとして高感度レジスト／低感度レジストの構造を取ることにより、低抵抗、低容量のT字型ゲートを形成することもできる<sup>11) 12)</sup>。

一方、光露光においては通常の工程を用いるかぎり、アンダーカット形状を得ることはできない。このためにいくつかの提案が行われている。たとえば、工程がすこし複雑となるが、レジスト／金属膜／レジストの三層構造により、アンダーカット形状を形成する方法がある<sup>13)</sup>。また現像前にホトレジストをトリクロロベンゼンなどの溶液に浸して、ホトレジストの表面層を現像液に溶けにくくすることにより、アンダーカット形状を形成する方法も報告されている<sup>14)</sup>。

これに対して、さきに述べた二重レジスト法は光露光に適用することはできない。というのはホトレジストはプリベーク温度が低いために、低感度ホトレジストと高感度ホトレジストが塗布時に混合してしまうからである。そこで、第二層のレジストをマスクとして第一層のレジストをプラズマエッチングすることにより、アンダーカット形状を形成する、プラズマエッチングを用いる二重レジスト法が考えられる<sup>15) 16)</sup>。

本章では、リフトオフに適したレジストパターンの形成方法として、

- (1) 電子ビーム露光による方法
- (2) 二重レジスト法（低感度レジスト／高感度レジスト）
- (3) 二重レジスト法（高感度レジスト／低感度レジスト）
- (4) プラズマエッチングを用いる二重レジスト法

について述べる。

## 8.2 電子ビーム露光による方法

### 8.2.1 シミュレーション

図8.3(a)、(b)にPMMAレジストの露光、現像後のレジスト断面形状をシミュレーションした結果を示す。

加速電圧は20kV、レジスト膜厚は0.7 $\mu\text{m}$ でSi基板を用いている。露光量Qは220 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、ビーム径は0.05 $\mu\text{m}$ 、走査線間隔dは0.03 $\mu\text{m}$ であり、走査線数lは(a)が1本であるのに対して、(b)が10本である。なお、現像液は弱現像液MIBK:IPA=1:3を用いた。

この場合、露光量は、10本線露光に対して最適に合わせられているので、(b)においては現像時間が1分30秒でパターンがぬけ、2分以上ではアンダーカット形状がえられ、現像時間の増大にともなうパターン幅の広がりも少ない。

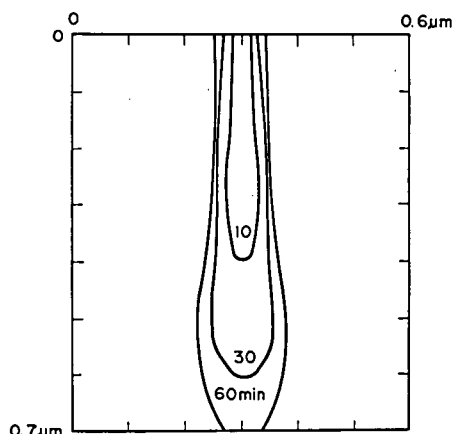
一方、(a)に示す1本線露光においては、220 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ では露光量が不足しているため、長時間の現像

が必要であり、それにともなうパターン幅の広がり問題となる。

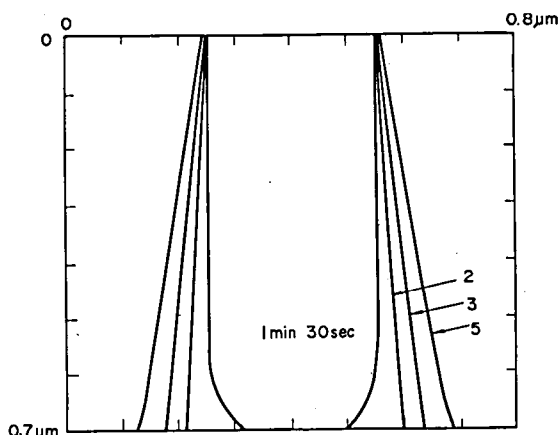
PMMAを弱現像液（MIBK：IPA = 1：3）で用いると、図 4.2 に示すように高い解像度が得られる。このように解像度の高いレジストを用いる場合は、図 8.3(b) に示すように、露光量を最適にして、現像時間を長くすることにより、アンダーカット形状を得ることができ、その際にパターン幅の増大もほとんどない。しかし、露光量が適当でないと、図 8.3(a) に示すように長時間の現像が必要となる。同じ現像時間で、すべてのパターンについてアンダーカット形状を得るためには、各パターンについて正確な露光量の制御が必要である。

図 8.4 に強現像液（MIBK）を用いた場合のレジスト断面形状を示す。レジストの厚さは  $0.5\mu\text{m}$ 、露光量は  $64\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、ビーム径は  $0.1\mu\text{m}$ 、走査線間隔は  $0.06\mu\text{m}$ 、走査線数は 6 本である。

この場合も現像時間を長くすることにより、アンダーカット形状を得ることができる。しかし、弱現像液を用いる場合に比べて、膜べりおよびレジストの肩の部分のだれが大き



(a)  $l = 1$



(b)  $l = 10$

図 8.3 PMMAレジストの露光、現像後の断面形状  
(数値計算結果)

$Q = 220\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d = 0.03\mu\text{m}$ 、現像 MIBK：IPA=1：3

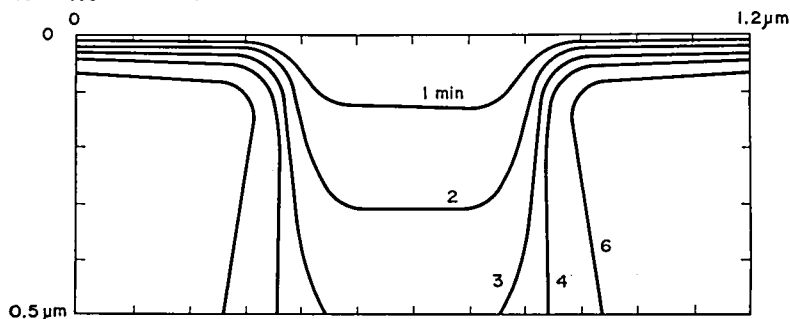


図 8.4 PMMAレジストの露光、現像後の断面形状  
(数値計算結果)

$Q = 64\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d = 0.03\mu\text{m}$ ,  $l = 6$ 、現像 MIBK

いので注意する必要がある。

なお、ここでは現像時間を変化させたか、現像時間を一定として露光量を変えてレジスト断面形状を求めることができる。その場合、露光量が大いほどアンダーカット形状が得やすいが、パターン幅の広がりも大きくなる。

## 8.2.2 実験

図 8.5、図 8.6 に PMMA レジストの電子ビーム露光、現像後の断面形状を示す。加速電圧は 20 kV、基板は Si であり、現像は弱現像液 (MIBK : IPA = 1 : 3) である。

図 8.5 においてレジストの厚さは  $1\text{ }\mu\text{m}$ 、露光量は  $256\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、ビーム径は  $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、走査線間隔は  $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 、走査線数は 16 本、現像時間は 1 分である。断面が逆テーパ状で肩だれないアンダーカット形状が形成されていることがわかる。

図 8.6 に露光パターン幅によるレジスト断面形状の変化を示す。(a) が走査線数 10 本、(b) が走査線数 6 本である。なお、レジストの厚さは  $0.7\text{ }\mu\text{m}$ 、露光量は  $220\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、ビーム径は  $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 、走査線間隔は  $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 、現像時間は 1 分 30 秒である。

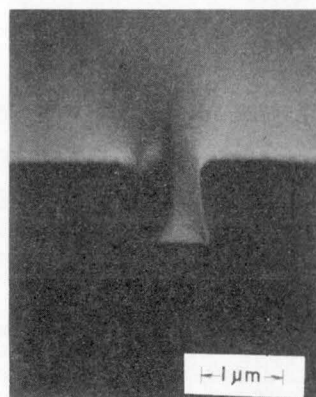
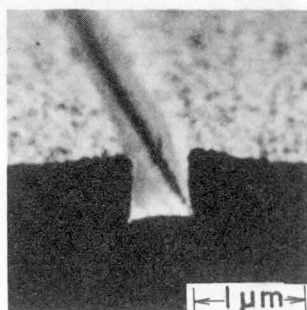


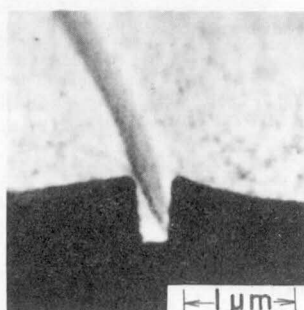
図 8.5 PMMA レジストの露光、現像後の断面形状

(実験結果)

$Q = 256\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d = 0.06\text{ }\mu\text{m}$ ,  $\ell = 16$   
現像 MIBK : IPA = 1 : 3 1 分



(a)  $\ell = 10$



(b)  $\ell = 6$

図 8.6 PMMA レジストの露光、現像後の断面形状

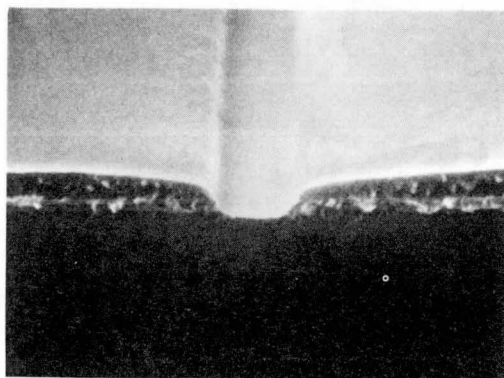
(実験結果)  $Q = 220\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d = 0.03\text{ }\mu\text{m}$ , 現像 MIBK : IPA = 1 : 3 1.5 分

(a) においてアンダーカット形状が得られるのに対し、(b) では断面がほぼ垂直である。

つぎに、PMMA (弱現像) に比べて解像度の低いポジ形レジスト EBR-9 の断面形状を図 8.7 に示す。レジストの厚さは  $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、露光量は  $12\text{ }\mu\text{C}/\text{cm}^2$  で、走査線間隔  $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 、走査線数 5 本である。現像は MIBK : IPA = 4 : 1 を用いて 7 分 30 秒行った。肩の部分がなだらかな断面形状であり、アンダーカット形状は得られていない。EBR-9 を用いた場合は露光、現像条件を変えてもアンダーカット形状は得られなかった。アンダーカット形状を得るためには、解像度の高いレジストが必要である。



図8.5、図8.6に示すようなレジストパターンを形成後、金属蒸着、リフトオフを行うことにより、微細金属パターンを形成することができる。図8.8にリフトオフにより形成したAlパターンの断面を示す。レジストはPMMAを用い、Al蒸着後トリクロルエチレン中でボイルすることにより、不要金属部をレジストとともに除去した。Alの高さは $0.5\mu\text{m}$ 、幅は $0.2\mu\text{m}$  (a)および $0.5\mu\text{m}$  (b)で、長方形に近い断面の金属パターンがえられている。



### 8.2.3 まとめ

電子ビーム露光によりアンダーカット形状を形成するために、必要な条件をシミュレーションおよび露光実験より求めた。

図8.7 EBR-9レジストの露光、現像後の断面形状 (実験結果)

$Q=12\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d=0.06\mu\text{m}$ ,  $l=5$   
 現像 MIBK:IPA=4:1 7.5分

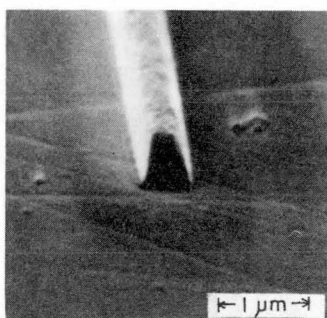
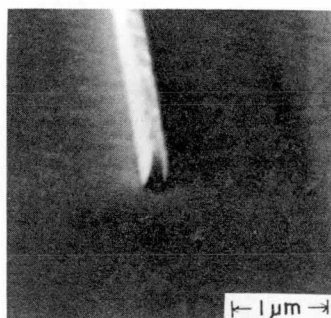


図8.8 リフトオフ法により形成したAl電極の断面図  
 (a) パターン幅  $0.2\mu\text{m}$  (b) パターン幅  $0.5\mu\text{m}$

アンダーカット形状を得るためには、高い解像度を持つレジストを用いて、現像時間を長く（あるいは露光量を大きく）する必要があること、およびパターンに応じて露光量を制御しなければならないことを明らかにした。

## 8.3 二重レジスト技術

本節では、電子ビーム露光により形成されるレジスト断面形状を、二重レジスト (LO/HI, HI/LO) の場合について、シミュレーションにより求めて、露光実験と比較した結果を述べる。

始めに、8.3.1において、二重レジスト法で使用するレジストの溶解特性を求めて、定性的な断面形状を示す。つぎに、8.3.2においては、レジストの溶解特性とモンテカルロ法により二重レジストの断面形状を求める。さらに、8.3.3では、二重レジストの実験結果を、LO/HI構造およびHI/LO構造について示し、シミュレーション結果との比較を行う。

### 8.3.1 レジストの溶解特性

二重レジスト法において最も重要なことは、感度が適当に異なる二種類のレジストを組み合わせることである。我々は低感度レジストとして通常のPMMAを、高感度レジストとして新しく開発されたMPRを用いた。

二重レジストとして使用するのに適した現像条件を見出すために、いろいろな現像液についてPMMAとMPRの溶解特性を求めた。その結果を図8.9に示す。図よりカーブフィティングにより求めた式6.4の定数を表8.1に示す。

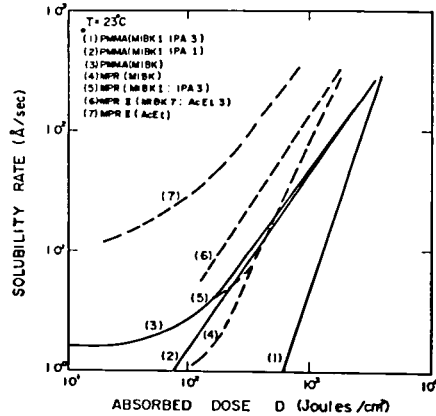


図 8.9 PMMAとMPRの溶解特性

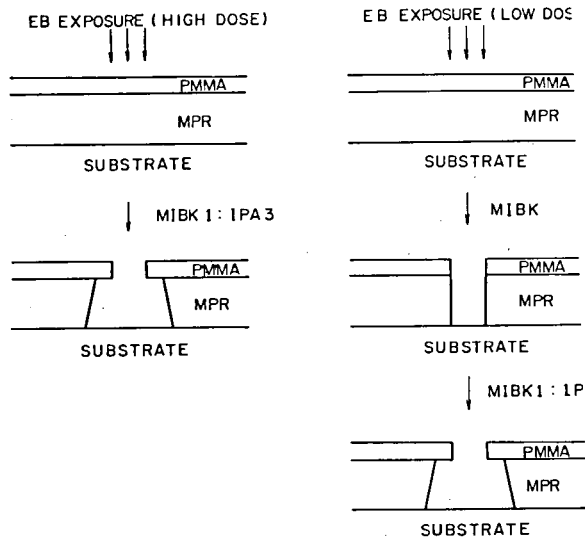
表 8.1 溶解速度曲線の定数

Resist	Developer	$R_1$	$C_m$	$D_0$	$\alpha$
PMMA	1:3	1	0	600	3.1
PMMA	1:0	1.8	0.8	200	1.8
MPR	1:3	2.0	0.8	400	3.0
MPR	1:0	2.9	0.5	400	3.0

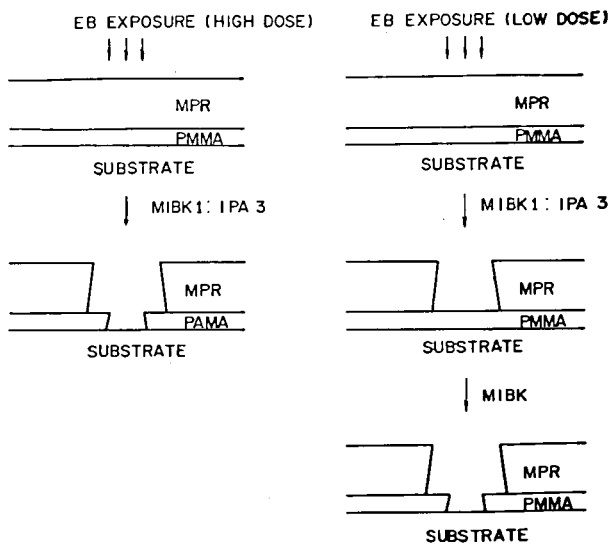
PMMAの溶解速度は、現像液中のMIBKの含有率が高くなるにつれて大きくなる。一方、MPRの溶解速度は現像液中のMIBKの含有率にはほとんど依存せず一定である。MIBK : IPA=1 : 3の現像液に対して、MPRの感度はPMMAの感度より一桁高い。またMIBK : IPA=1 : 0の現

像液に対してはPMMAとMPRはほぼ同じ感度を示す。この関係を利用することにより、PMMAとMPRの組み合わせを二重レジストとして用いることができる。

図8.10、図8.11にPMMAとMPRで形成される二重レジストの定性的な断面形状を示す。図8.10はPMMA/MPR (LO/HI)構造、図8.11はMPR/PMMA (HI/LO)構造である。比較的露光量が大いときは、PMMAの溶解速度がMPRに比べて小さい、MIBK : IPA=1 : 3の現像液を用いることにより、図8.10(a)、図8.11(a)に示す、アンダーカット形状もしくはT字型断面形状を得ることができる。一方、露光量が小さい場合には、PMMAがMIBK : IPA=1 : 3の現像液にほとんど溶けないので、2段階現像を行う。すなわち、図8.10(b)、図8.11(b)に示すように、MIBK : IPA=1 : 0の現像液を用いて、PMMAのパターニングを行う。



(a) 露光量が大きいとき (b) 露光量が小さいとき  
図 8.10 LO/Hi (PMMA/MPR) 二重レジストの説明図



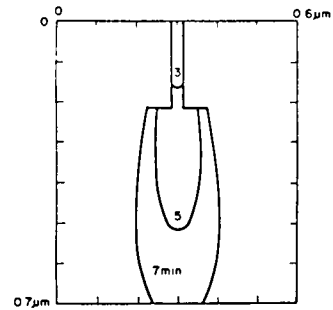
(a) 露光量が大きいとき (b) 露光量が小さいとき  
図 8.11 Hi/LO (MPR/PMMA) 二重レジストの説明図

### 8.3.2 シミュレーション

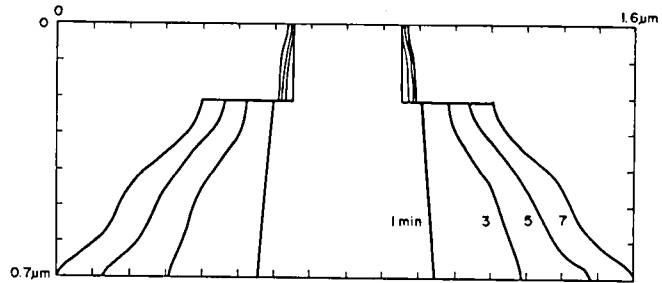
二重レジストの断面形状シミュレーションも第6章に示した一重レジストの場合に準じて行うことができる。レジスト中に吸収されるエネルギーの計算はすべてPMMAについて行い、MPRについては行わなかった。この理由は、PMMAとMPRを構成する分子式がよく似ている<sup>17)</sup>ためにMPRにかえてPMMAを用いてもほとんど誤差を生じないからである。パターンは、走査線間隔  $0.06\mu\text{m}$  あるいは  $0.03\mu\text{m}$  で描画しており、それはそれぞれビーム径  $0.1\mu\text{m}$  および  $0.05\mu\text{m}$  に対応している。

図8.12に  $0.2\mu\text{m}$  PMMA/ $0.5\mu\text{m}$  MPR (LO/HI) 二重レジストの断面形状を示す。(a)は走査線数1本であり、(b)は走査線間隔  $0.03\mu\text{m}$  で走査線数10本で書かれた  $0.3\mu\text{m}$  線である。露光量は  $220\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、現像液は MIBK:IPA = 1:3 である。

さきに図8.3に示したPMMA一重レジストの場合、アンダーカット形状を得るのに要する時間は60分(走査線数1本)および2分(走査線数10本)である。これに対してここで示すLO/HI二重レジスト構



(a)  $\ell = 1$



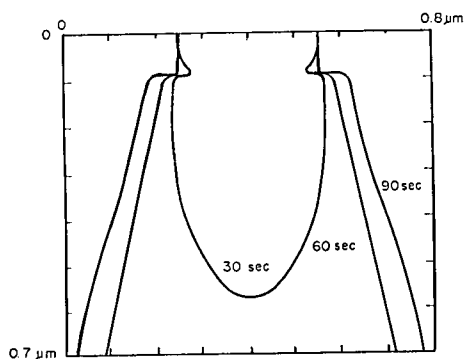
(b)  $\ell = 10$

図8.12 LO/HI二重レジストの露光、現像後の断面形状  
(数値計算結果)

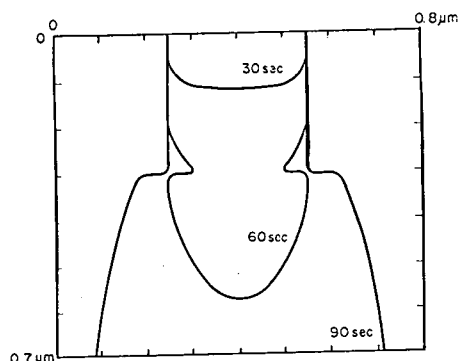
$0.2\mu\text{m}$  PMMA/ $0.5\mu\text{m}$  MPR、 $Q=220\mu\text{C}/\text{cm}^2$   
 $d=0.03\mu\text{m}$ 、現像 MIBK:IPA=1:3

造の場合は、アンダーカット形状を得るのに要する現像時間は7分((a))および1分((b))である。走査線数1本の場合、二重レジスト法の場合は第二層のPMMAレジストのパターン幅がほとんど変わらないのに対して、PMMA一重レジストの場合は、現像時間増大にともないパターン幅が広がってしまう。PMMA一重レジストの場合は、60分の現像時間でパターン幅は  $0.1\mu\text{m}$  であり、これに対して二重レジストの場合は現像時間7分でパターン幅は  $0.03\mu\text{m}$  である。

つぎにLO/HI二重レジスト構造において、第二層のLOレジストの膜厚を変えて計算した結果を図8.13に示す。(a)は  $0.1\mu\text{m}$  PMMA/ $0.6\mu\text{m}$  MPR、(b)は  $0.3\mu\text{m}$  PMMA/ $0.4\mu\text{m}$  MPRで、露光、現像条件は図8.12と同じである。PMMAの膜厚が薄くなるほどアンダーカット形状を容易に得ることができる。しかし、PMMAの膜厚を  $0.1\mu\text{m}$  にすることは、実際の工程では難しいので、以下の露光実験ではPMMAの厚さは  $0.2\mu\text{m}$  としている。



(a)  $0.1\mu\text{m}$  PMMA/ $0.6\mu\text{m}$  MPR



(b)  $0.3\mu\text{m}$  PMMA/ $0.4\mu\text{m}$  MPR

図 8.13 LO/HI 二重レジストの露光、現像後の断面形状  
(数値計算結果)  $Q=220\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d=0.03\mu\text{m}$ ,  $l=10$  現像 MIBK:IPA = 1 : 3

図 8.14 に 2 段階現像により形成した LO/HI 二重レジストの断面形状を示す。露光量は図 8.12 に比べて小さく  $68\mu\text{C}/\text{cm}^2$  であり、走査線間隔は  $0.06\mu\text{m}$ 、走査線数は 5 本である。現像は IPA を含まない MIBK 現像液で 150 秒行った後、MIBK:IPA=1:3 の現像液でさらに 150 秒現像している。

以上のシミュレーション結果により LO/HI 二重レジスト構造は、リフトオフに適したアンダーカット形状を形成する場合、通常の一重レジストに比べて、露光量に対する依存性が少ないという結果が得られた。

つぎに、HI/LO (MPR/PMMA) 二重レジストの断面形状を図 8.15、図 8.16 に示す。二重レジストは  $0.5\mu\text{m}$

MPR/ $0.2\mu\text{m}$  PMMA からなる。図 8.15、図 8.16 の露光現像条件は、それぞれ図 8.12、図 8.14 と同じである。ただし現像時間は、図 8.15 が 6 分であり、図 8.16 は MIBK:IPA=1:3 で 10 分現像し

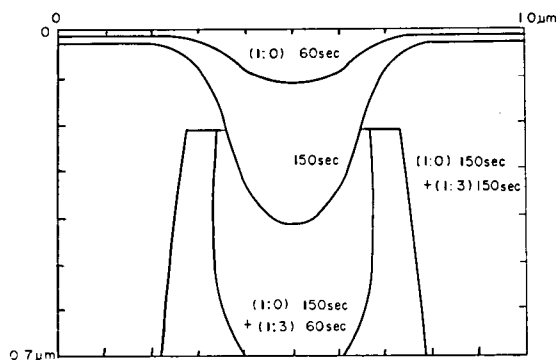


図 8.14 LO/HI 二重レジストの露光、現像後の断面形状  
(数値計算結果)  $0.2\mu\text{m}$  PMMA/ $0.5\mu\text{m}$  MPR  
 $Q=68\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d=0.06\mu\text{m}$ ,  $l=5$   
現像 MIBK 2.5分、MIBK:IPA=1:3 2.5分

た後、MIBK : IPA = 1 : 0 で  
30 秒現像を行っている。

HI / LO 二重レジスト構造に  
より T 字型のレジスト断面形状  
を形成することができる。LO-  
レジストのパターン幅に対する  
HI-レジストのパターン幅の比  
は、図 8.15 の場合 1.5、図 8.  
16 の場合、3 である。

### 8.3.3 実 験

#### A. LO/HI 二重レジスト

#### PMMA / MPR 二重レジスト

の現像後の断面形状を SEM に  
より観察した。試料の準備は次  
のとおりである。Si 基板上に  
0.5  $\mu\text{m}$  の厚さの MPR を塗布し、160  $^{\circ}\text{C}$   
10 分のプリベークを行う。続いて厚さ 0.2  
 $\mu\text{m}$  の PMMA を塗布し、160  $^{\circ}\text{C}$  20 分のプ  
リベークを行う。線幅 0.3  $\mu\text{m}$  (走査線数  
10 本) より線幅 5  $\mu\text{m}$  (走査線数 160 本)  
のパターンを露光量 220  $\mu\text{C}/\text{cm}^2$  で露光  
し、MIBK : IPA = 1 : 3 の溶液で 1 分間  
現像を行った。

なお、走査線間隔は、0.03  $\mu\text{m}$  である。

図 8.17 に断面形状を SEM 観察した結  
果を示す。0.3  $\mu\text{m}$  から 5  $\mu\text{m}$  までパター  
ン幅によらずリフトオフに適したアンダー  
カット形状が得られている。

図 8.18 に走査線数 10 本と走査線数 32  
本についてシミュレーションしたレジスト

断面形状を示す。図 8.17 (a) および (d) に示す実験結果は計算結果とよい一致を示す。

LO/HI 二重レジスト法においては、最小線間隔は高感度レジストの幅により制限される。前述した露  
光、現像条件では、0.5  $\mu\text{m}$  線の最小間隔は 1  $\mu\text{m}$  であり、2  $\mu\text{m}$  線の最小間隔は 1.4  $\mu\text{m}$  である。これを  
図 8.19 に示す。

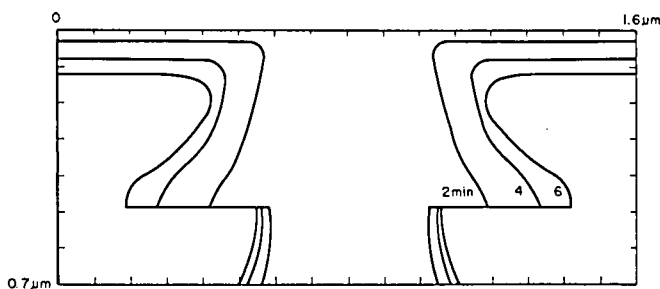


図 8.15 HI/LO 二重レジストの露光、現像後の断面形状

(数値計算結果) 0.5  $\mu\text{m}$  MPR / 0.2  $\mu\text{m}$  PMMA

$Q = 220 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d = 0.03 \mu\text{m}$ ,  $l = 10$

現像 MIBK : IPA = 1 : 3

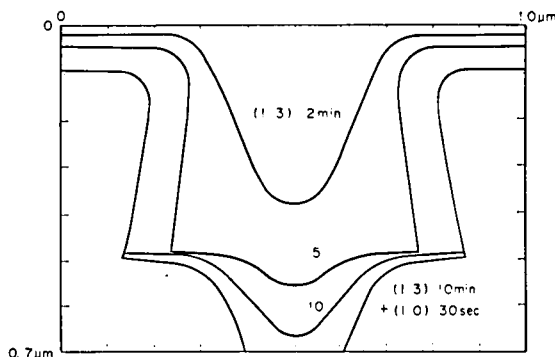


図 8.16 HI/LO 二重レジストの露光、現像後の断面形状

(数値計算結果)

0.5  $\mu\text{m}$  MPR / 0.2  $\mu\text{m}$  PMMA

$Q = 68 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d = 0.06 \mu\text{m}$ ,  $l = 5$

現像 MIBK : IPA = 1 : 3 10分、MIBK 30秒

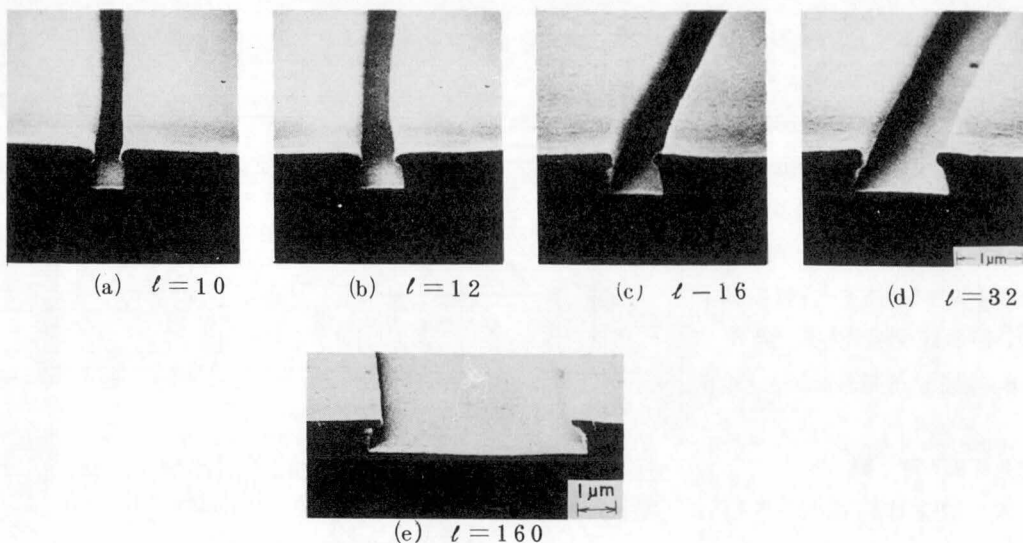


図8.17 LO/HI 二重レジストの露光、現像後の断面形状

(実験結果)  $0.2\mu\text{m}$  PMMA/ $0.5\mu\text{m}$  MPR  $Q=220\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d=0.03\mu\text{m}$   
 現像 MIBK:IPA=1:3 1分

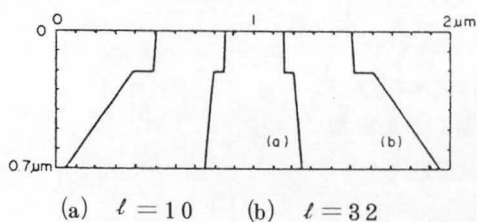


図8.18 LO/HI 二重レジストの露光、現像後の断面形状

(数値計算結果)  $0.2\mu\text{m}$  PMMA/ $0.5\mu\text{m}$  MPR  $Q=220\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d=0.03\mu\text{m}$   
 現像 MIBK:IPA=1:3

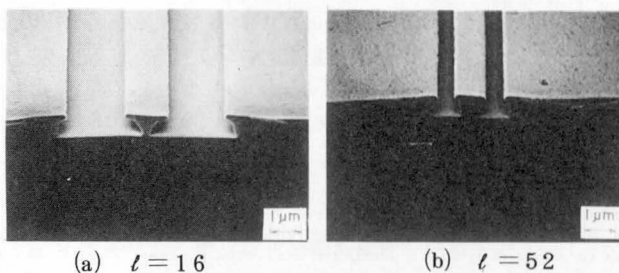


図8.19 LO/HI 二重レジストの露光、現像後の断面形状

(実験結果)  $0.2\mu\text{m}$  PMMA/ $0.5\mu\text{m}$  MPR  $Q=220\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d=0.03\mu\text{m}$   
 現像 MIBK:IPA=1:3 1分

シミュレーション結果から予想されたように、PMMA/MPR (LO/HI) 二重レジスト構造を用いることにより、広い露光量の範囲にわたり、サブミクロンパターンを含めたいろいろなパターンにアンダーカット形状を形成することができる。この事実は、LO/HI 二重レジスト法が、種々の線幅を含む複雑なパターンのリフトオフ工程に適用可能なことを示している。

#### B. HI/LO 二重レジスト

図 8.20、図 8.21 に HI/LO 二重レジストの断面形状を SEM により観察した結果を示す。図 8.20 は  $0.5\ \mu\text{m}$  MPR/ $0.5\ \mu\text{m}$  PMMA により形成されている。露光量は  $220\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、走査線間隔は  $0.03\ \mu\text{m}$ 、走査線数は 12 本であり、MIBK:IPA=1:3 の溶液で 90 秒現像を行った。図 8.21 は、 $1\ \mu\text{m}$  MPR/ $0.5\ \mu\text{m}$  PMMA により形成されている。露光量は  $68\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、走査線間隔は  $0.06\ \mu\text{m}$ 、走査線数は 6 本である。露光後、2 段階現像を行い、MIBK:IPA=1:3 の溶液で 12 分現像した後、IPA を含まない MIBK を用いて 30 秒現像を行った。LO レジストのパターン幅に対する HI レジストのパターン幅の比は図 8.20 では 1.8、図 8.21 では 3.5 である。

図 8.22 に図 8.20 に示す HI/LO 二重レジストを用いてリフトオフにより形成した Al 電極の断面を示す。T 字型のゲート電極が得られ、ゲート長は  $0.4\ \mu\text{m}$ 、上側の導電金属層の幅は  $0.7\ \mu\text{m}$  である。この T 字型ゲートは、ゲート容量を小さくして、しかもゲート抵抗をさげることができるので、GaAs FET、GaAs IC のサブミクロンゲートに適した構造である。

#### 8.3.4 まとめ

二重レジスト法について詳細に述べた。

LO/HI (PMMA/MPR) 二重レジストおよび HI/LO (MPR/PMMA) 二重レジストについて数値計算および電子ビーム露光実験を行った。LO/HI 二重レジスト構造により、露光量の広い範囲にわたってリフトオフに

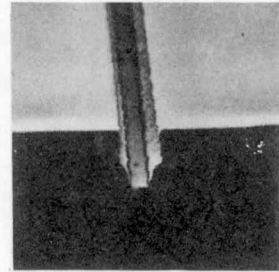


図 8.20 HI/LO 二重レジストの露光、  
現像後の断面形状  
(実験結果)  
 $0.5\ \mu\text{m}$  MPR/ $0.5\ \mu\text{m}$  PMMA  
 $Q = 220\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d = 0.03\ \mu\text{m}$ ,  $\ell = 12$   
現像 MIBK:IPA=1:3 90 秒

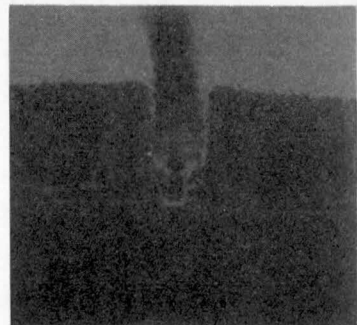


図 8.21 HI/LO 二重レジストの露光、  
現像後の断面形状  
(実験結果)  
 $1\ \mu\text{m}$  MPR/ $0.5\ \mu\text{m}$  PMMA  
 $Q = 68\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $d = 0.06\ \mu\text{m}$ ,  $\ell = 6$   
現像 MIBK:IPA=1:3 12 分、  
MIBK 30 秒



適したアンダーカット形状が得られることを明らかにした。一方、HI/LO二重レジスト構造により、低容量、低抵抗のT字型微細ゲート電極を容易に形成することができる。この二重レジスト法はサブミクロン領域のパターン形成に幅広い応用が可能である。

## 8.4 プラズマエッチングを用いた二重レジスト技術

### 8.4.1 方法

図8.23に二重レジストとプラズマエッチングを用いたレジストパターン形成方法およびリフトオフによる金属パターン形成方法を示す。はじめに、基板の上にレジストⅠ、レジストⅡを順に塗布する(図8.23(a))。次に露光、現像を行い、レジストⅡのみにパターンを形成する(図8.23(b))。露光は、光、電子ビームいずれを用いてもよい。さらに $O_2$ プラズマエッチングにより、レジストⅠの一部を除去して、断面がアンダーカットの形状になるようにする(図8.23(c))。金属を蒸着し、その後レジストⅠを除去することにより、所望の金属パターンを形成することができる(図8.23(e))。

この方法において最も重要なことは、目的に合った性質のレジストⅠおよびレジストⅡを使用することである。この2種類のレジストに必要な条件としては、第一にレジスト塗布時にレジストⅠとレジストⅡが混合しないこと、第二にレジストⅠはレジストⅡの現像液に対して不溶であること、第三に $O_2$ プラズマ中でレジストⅠのエッチレート(etch rate)がレジストⅡのエッチレートに比べて大きいこと、の3点である。

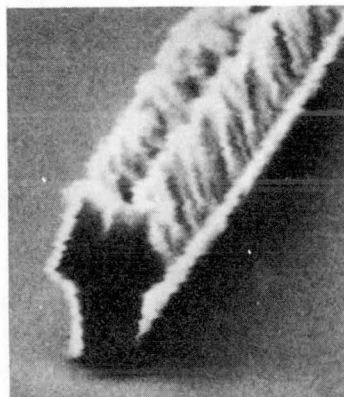


図 8.22 T字型ゲート電極

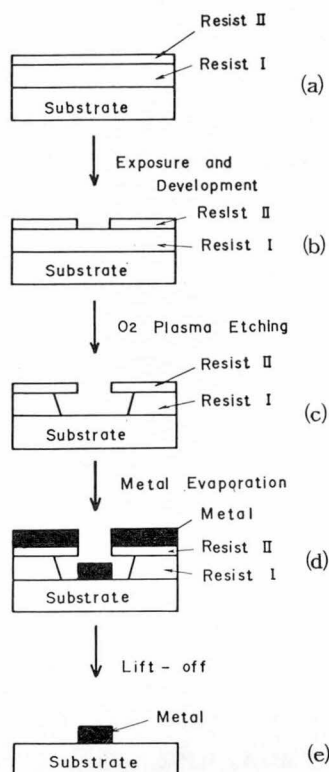


図 8.23 プラズマエッチングを用いた二重レジスト法の説明図

#### 8.4.2 レジストのエッチレート

さきに述べた条件の第三を満足するレジストの組み合わせを見出すために、各種レジストについて  $O_2$  プラズマエッチング実験を行った。実験に用いた装置は、円筒型プラズマエッチング装置（LFE製PFS/PCrE/PDS501）および平行平板型プラズマエッチング装置（アネルバ製DEM451）であり、高周波（RF）電源はいずれも13.56 MHzである。

はじめに円筒型装置における実験結果を述べる。図8.24に市販の各種レジストの  $O_2$  プラズマに対する膜べりを示す。RF電力は400W、圧力は10 Torrである。PBS（ポリブテン sulfon）のエッチレートは、PMMA（ポリメチルメタアクリレート）やOFPR800に比べて非常に大きい。なお図には示していないが、AZ1350、AZ2400のエッチレートもOFPR800と同程度である。PBSとOFPR800のエッチレートの比をとると、図8.25、図8.26に示すように、その比は  $O_2$  圧力およびRF電力に依存し、それらが大きいほど比が大きくなる。またOFPR800の現像液はPBSを溶解せず、塗布時にも混合しないので、PBSをレジストⅠ、OFPR800をレジストⅡとして用いることができる。

次に平行平板型装置における結果を述べる。図8.27に各種レジストの  $O_2$  プラズマに対する膜

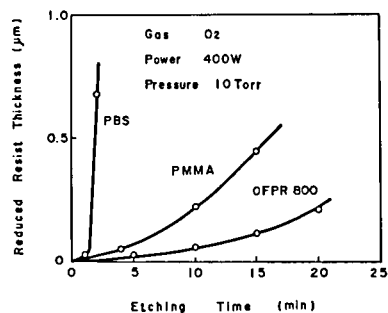


図8.24 円筒型プラズマエッチング装置におけるレジストの膜べり

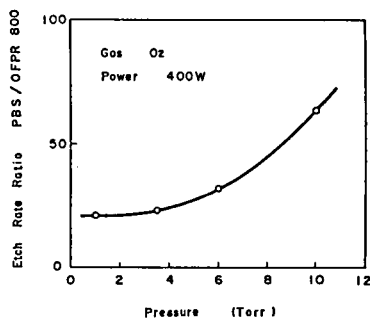


図8.25 円筒型プラズマエッチング装置におけるレジストエッチレートの圧力依存性

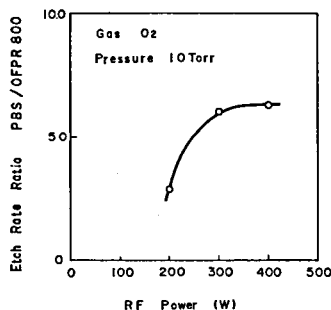


図8.26 円筒型プラズマエッチング装置におけるレジストエッチレートの高周波出力依存性

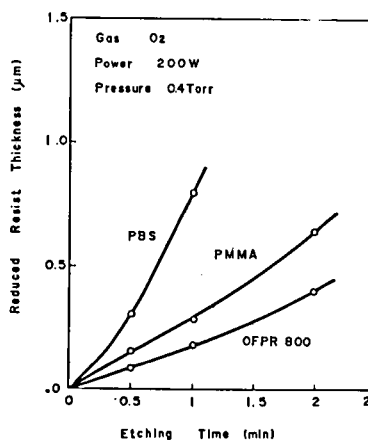


図8.27 平行平板型プラズマエッチング装置におけるレジストの膜べり

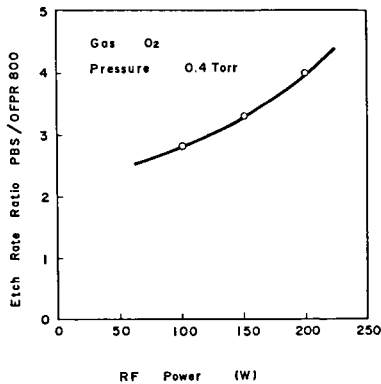


図 8.28 平行平板型プラズマエッチング装置におけるレジストエッチレートの高周波出力依存性

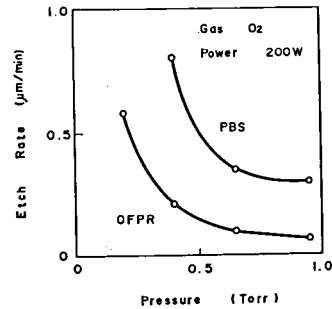


図 8.29 平行平板型プラズマエッチング装置におけるレジストエッチレートの圧力依存性

べりを示す。RF電力は200W、圧力は0.4 Torrである。PBSのエッチレートはOFPR 800のそれよりも大きい、両エッチレートの比は円筒型装置の場合ほど大きくない。図 8.28、図 8.29 に示すようにO<sub>2</sub>圧力およびRF電力を変えても最大4程度にしかない。しかし、図 8.30 に示すように、レジストのエッチレートが基板に垂直方向と水平方向において異なり、その比はO<sub>2</sub>圧力が低くなるほど小さくなる。よってO<sub>2</sub>圧力を適切に調節することによって、パターン幅をあまり変えずにアンダーカット形状を作ることができる。

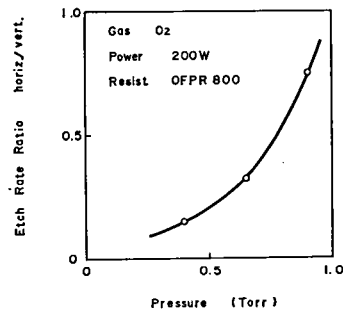
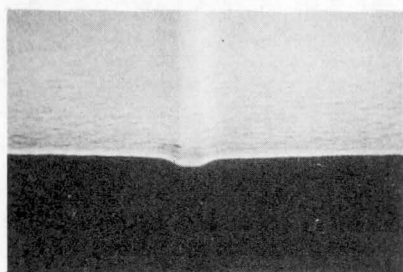


図 8.30 平行平板型プラズマエッチング装置におけるレジストエッチングの異方性

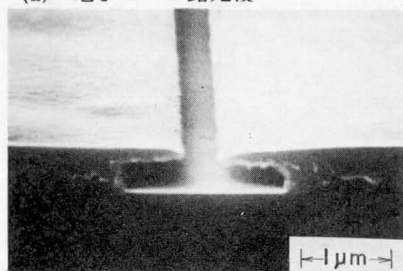
#### 8.4.3 リフトオフ用レジストパターンの形成

Si 基板上にPBSを塗布し、160℃、10分間のプリバークを行った後、さらにOFPR800を塗布し、85℃、20分間のプリバークを行った。露光は光露光または電子ビーム露光を用いた。光露光の場合は通常の紫外線露光装置を用い、電子ビーム露光の場合は、スポットビームによるベクタースキャン方式の露光装置（日本電子製、JBX-5A型）を用い、加速電圧20kV、走査線数16本/μmで行った。OFPR 800の現像にはAZ 2401デベロッパー：H<sub>2</sub>O = 1 : 4を用いた。ついでPBSのプラズマエッチングを行ったが、その前後において走査電子顕微鏡を用いてレジストの断面形状を観察した。

図 8.31 (a)に電子ビーム露光、現像後の、(b)に円筒型装置によりプラズマエッチングしたあとのレジス

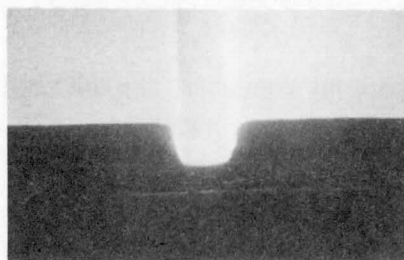


(a) 電子ビーム露光後

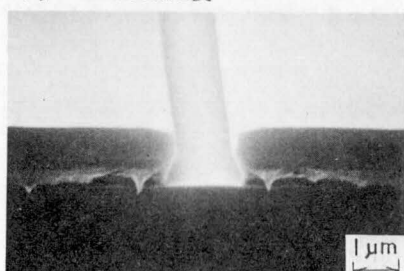


(b) 円筒型装置によりプラズマエッチング後

図 8.31 二重レジストの断面形状



(a) 紫外線露光後



(b) 平行平板型装置によりプラズマエッチング後

図 8.32 二重レジストの断面形状

ト断面形状を示す (OFPR800  $0.2 \mu\text{m}$  / PBS  $0.4 \mu\text{m}$ )。露光量は  $3.2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、現像時間は 30 秒、プラズマエッチングは RF 電力 400 W、圧力 10 Torr の条件で 2 分間である。この断面形状から、プラズマエッチングによりアンダーカット形状ができる際に OFPR800 のパターン幅が変化しないこと、したがって OFPR800 の微細パターンがそのままリフトオフ用のマスクになることがわかる。

図 8.32 (a) に光露光、現像後の、(b) に平行平板型装置によりプラズマエッチングしたあとのレジスト断面形状を示す (OFPR800  $0.6 \mu\text{m}$  / PBS  $0.6 \mu\text{m}$ )。プラズマエッチングは、RF 電力 200 W、圧力 0.4 Torr の条件で 1.5 分間行った。OFPR800 のパターン幅は、プラズマエッチングによりほとんど変化していない。アンダーカット量が小さいのでこの方法は近接したパターンの形成に適している。図 8.33 にラインおよびスペースを形成した例を示すが、最小間隔  $0.7 \mu\text{m}$  が得られている。

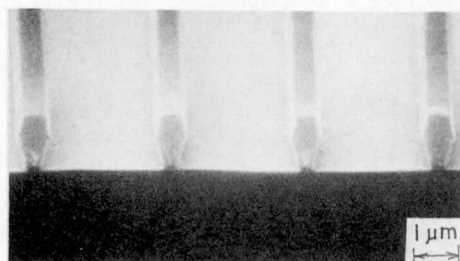


図 8.33 ラインおよびスペースを描画した二重レジストの断面形状

#### 8.4.4 ま と め

二重レジストとプラズマエッチングを用いて、リフトオフに適したレジスト断面形状を形成する方法を述べた。

円筒型装置を用いる場合には、最小線幅  $0.3\ \mu\text{m}$  の超微細なレジストパターンを形成することができる。一方、平行平板型装置を用いる場合には、 $1\ \mu\text{m}$  以下の間隔の微細パターンを形成できる。

本方法は、露光は光および電子ビームのどちらでも行い得ること、第一層のレジストが  $\text{O}_2$  プラズマエッチングされるのでスカム除去工程が不要であること、第一層のレジストが基板の凹凸を平滑にするので、第二層のレジストは薄くかつ一様にでき、微細パターンの形成に有利である、などのすぐれた特長を持っており、リフトオフを用いた微細金属パターンの形成に幅広い応用が期待される。

## 参 考 文 献

- (1) M. Hatzakis, "Electron resists for microcircuit and mask production," J. Electrochem. Soc., vol.116, no.7, pp.1033-1037, July 1969.
- (2) H.W. Lehmann and R.D. Widmer, "Dry etching for pattern transfer," J. Vac. Sci. Technol., vol.17, no.5, pp.1177-1183, Sept./Oct. 1980.
- (3) M. Hatzakis and A.N. Broers, "Electron-Beam techniques for fabricating fine metal lines," Record of 11th Symposium on Electron, Ion and Laser Beam Technology, Boulder, CO, 1971; R.F.M. Thomley, Ed., San Francisco Press, pp.337-344.
- (4) F.S. Ozdemir, G.O. Ladd, D.D. Loper, F.W. Cleary, and N. Hirsch, "Electron microfabrication of GaAs SBFET's," Proc. 7th Int. Conf. on Electron and Ion Beam Sci. and Technol., 1976, pp.411-416.
- (5) R.S. Bultine, R.H. Bennet, D. Parker, A.J. Hughes, and J.A. Turner, "200 nanometer gate length FET's," Proc. 6th Biennial Cornell Electrical Engineering Conference, 1977, pp.143-149.
- (6) T.G. Blocker, H.M. Macksey, and F.H. Doerbeck, "Electron-beam fabrication of submicron gates for GaAs FET's," J. Vac. Sci. Technol., vol.15, no.3, pp.965-968, May/June 1978.
- (7) N. Kato, T. Mizutani, S. Ishida, and M. Ohmori, "Electron-beam fabrication of submicrometer gates for a GaAs MESFET logic," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-27, no.6, pp.1098-1101, June 1980.
- (8) M. Hatzakis, "Recent developments in electron-resist evaluation techniques," J. Vac. Sci. Technol., vol.12, no.6, pp.1276-1279, Nov./Dec. 1975.
- (9) W.D. Grobman, H.E. Luhn, T.P. Donohue, A.J. Speth, A. Wilson, M. Hatzakis, and T.H.P. Chang, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: part VI - electron-beam lithography," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.360-368, April 1979.
- (10) 戸所義博, 加納剛太, 寺本巖雄, "電子ビーム露光法によるGaAs基板上サブミクロンリフトオフ技術", 第10回理研シンポジウム, PP 163 - 166, 1979.

- (11) Y. Todokoro, "Double-layer resist films for submicrometer electron-beam lithography," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-27, no.8, pp.1443-1448, August 1980.
- (12) 戸所義博, 武田節子, “電子ビーム露光を用いたT字型ゲートの形成”, 第40回応用物理学会講演予稿集, 2P-A-4, 1979.
- (13) K. Grebe, I. Ames, and A. Ginzberg, "Masking of deposited thin films by means of an aluminium-photoresist composite," J. Vac. Sci. Technol., vol.11, no.1, pp.458-460, Jan./Feb. 1974.
- (14) M. Hatzakis, B.J. Canavello, and J.M. Shaw, "Single-step optical lift-off process," IBM J. Res. Develop., vol.24, no.4, pp.452-460, July 1980.
- (15) 戸所義博, “プラズマエッチングを用いたリフトオフ用レジストパターンの形成”, 日本学術振興会薄膜132 委員会イオンプラズマプロセッシング小委員会 第10回研究会資料, PP. 10 - 13, 1981.
- (16) Y. Todokoro, "Double-layer resist-films for optical and electron beam microlithography," Trans. IECE Jap., vol. E65, no.1, pp.23-27, Jan. 1982.
- (17) 日比野邦男, 竹山健一, 森本孝克, 松浦静也, 小西文弥, “ボジ形電子線レジスト(架橋型)”, “第10回理研シンポジウム”, PP. 175 - 178, 1979.

## 第 9 章 プロセス技術

### 9.1 GaAs 結晶のプラズマエッチング

#### 9.1.1 はじめに

半導体デバイスの高性能化、高集積化にともない、微細パターン形成の技術が非常に重要になった。エッチング技術は露光技術とともに微細加工の基本技術であるが、従来のウェットエッチングではアンダーカットが大きく、微細パターンの形成に限界が生じてきた。

プラズマエッチングは、ウェットエッチングに比べ微細加工性、制御性にすぐれているほか、工程簡略化、自動化も容易であり、公害への影響も少ない。そのため Si 半導体集積回路の製造にしたいに実用化されている<sup>(1)</sup>。表 9.1 に各種材料に対する代表的な反応ガスを示す<sup>(2)</sup>。

表 9.1 プラズマエッチングにおける各種材料のエッチレート

被エッチング材料	円筒型装置			平行平板型装置		
	反応ガス	エッチング速度 ( $\text{\AA}/\text{min}$ )	参考文献	反応ガス	エッチング速度 ( $\text{\AA}/\text{min}$ )	参考文献
SiO <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>	200	(3)	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	2000	(4)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	CF <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>	1000	(3)	CF <sub>4</sub>	580	(5)
PSG	CF <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>	500	(3)	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	3500	(4)
Si	CF <sub>4</sub> + N <sub>2</sub>	2300	(6)	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	400	(4)
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CCl <sub>4</sub> + Ar	60	(7)			
Cr	Cl <sub>2</sub> + Ar	100	(8)	CCl <sub>4</sub> + Ar	250	(3)
W	CF <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>	1000	(3)	CCl <sub>4</sub> + Ar		(3)
Au	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	250	(9)			
Mo	CF <sub>4</sub>	270	(10)			
Ti	C <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	150	(9)	CCl <sub>4</sub> + Ar		(3)
Al				CCl <sub>4</sub> + Ar	820	(11)

一方、Ⅲ-V 族化合物半導体の製作工程においても、GaAs FET、GaAs IC、半導体レーザ、光 IC など微細化への要求が強い。しかし、従来 GaAs のプラズマエッチングについては詳細な報告が行われていない。本章では GaAs 結晶のプラズマエッチングについて述べる<sup>(2)(3)</sup>。

#### 9.1.2 エッチング速度

実験には円筒型プラズマエッチング装置 (LFE 製 PDS/PDE 301) を用いた。図 9.1 にエッチング時間と GaAs ((100) 面) のエッチング深さとの関係を示す。高周波出力は 400W、圧力は 1 Torr および 2 Torr、エッチングガスは CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> である。(a) は反応管内側に金属円筒がある場合、(b) はない場



合を示す。

エッチング速度は金属円筒がある場合  $1\mu\text{m}/\text{min}$ 、ない場合  $10\mu\text{m}/\text{min}$  であり、金属円筒の有無でエッチング速度に 10 倍の差がある。これは主として試料の温度上昇によるものである。

表 9.2 に高周波出力、圧力の変化に対する GaAs のエッチング速度の変化を示す。エッチング速度は高周波出力に大きく依存し、ガス圧力にはあまり影響を受けない。

表 9.2 GaAs のエッチング速度

高周波出力	200W	300W	400W
金属円筒あり		$0.25\mu\text{m}/\text{min}$	$1\mu\text{m}/\text{min}$
金属円筒なし		$2\mu\text{m}/\text{min}$	$9\mu\text{m}/\text{min}$

圧力 2 Torr

圧 力	0.5 Torr	1 Torr	2 Torr
金属金筒あり		$0.9\mu\text{m}/\text{min}$	$1\mu\text{m}/\text{min}$
金属円筒なし	$5\mu\text{m}/\text{min}$	$10\mu\text{m}/\text{min}$	$9\mu\text{m}/\text{min}$

高周波出力 400 W

### 9.1.3 エッチングの異方性

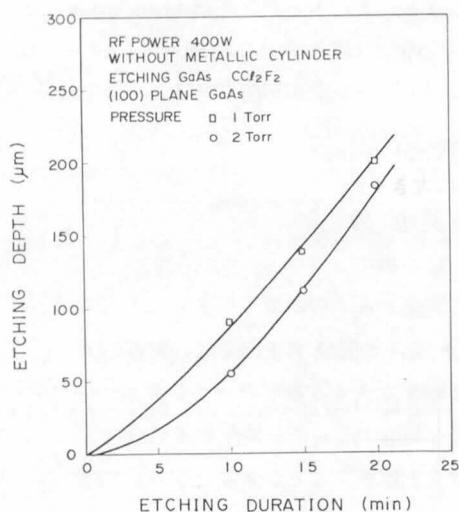
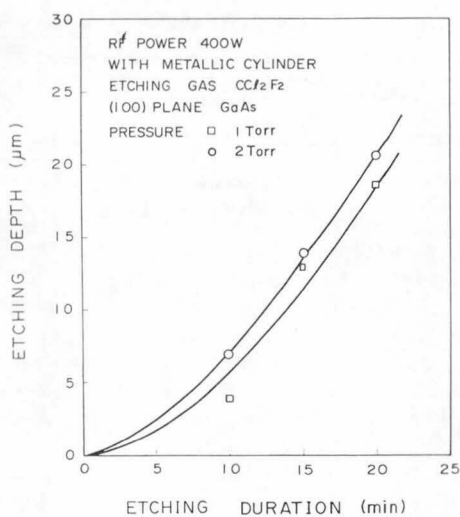
GaAs 基板にレジストを塗布し、 $100\mu\text{m}$   $\phi$  の円形の窓をあけて、プラズマエッチングを行った。その結果を図 9.2 に示す。断面は結晶方向に応じた異なったテーパ形状を示す。これは Zincblends 型結晶に特有な異方性である。

このときのサイドエッチングの量を求めると図 9.3 のようになる。ウェットエッチングの場合と同様に (111) 面があらわれやすいためと考えられる。

### 9.1.4 選択エッチング

$\text{CCl}_2\text{F}_2$  ガスを用いると GaAs のみをエッチングし、GaAlAs をエッチングしない (エッチング速度  $1/100$  以下) ので、GaAs の選択エッチングに利用できる。図 9.4 は GaAlAs 上の GaAs をエッチングしたときの断面図を示す。

GaAs と GaAlAs のヘテロ接合は、半導体レーザ、超格子、HEMT トランジスタなどに用いられる



(a) 金属円筒あり

(b) 金属円筒なし

図 9.1  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  による GaAs 結晶のエッチング

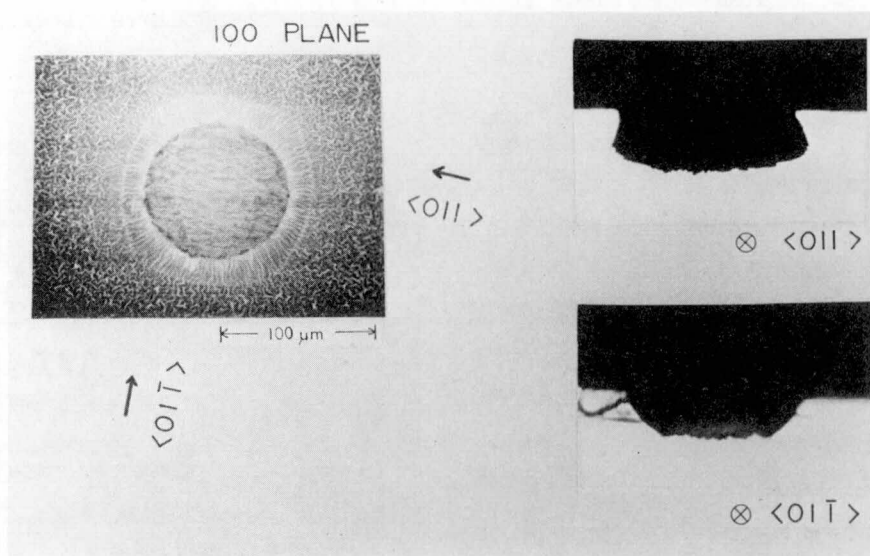


図 9.2 GaAs の異方性エッチング、GaAs (100) 面の窓エッチングとその断面

重要な技術であり、プラズマを用いた選択エッチングは、これらの素子の微細加工に有用と思われる。

#### 9.1.5 まとめ

GaAs のプラズマエッチングについて述べた。高周波出力の変化と金属円筒の有無によりエッチング速

度を制御できること、エッチングは zincblende 型結晶に特有の異方性を示すこと、GaAlAs に対して選択エッチングが可能であることを明らかにした。

## 9.2 増速拡散

### 9.2.1 はじめに

半導体の表面から不純物原子を拡散によって導入し、pn 接合を形成する技術は、半導体素子の製造技術をささえる基本の一つである。特に pn 接合を利用する素子を製作する場合は、均一な拡散を実現することが重要となる。たとえば、アバランシェホトダイオードにおいては、拡散が不均一であれば、pn 接合面全体にわたってなだれ増倍が生じないので、良好な素子を得ることができない<sup>14)15)</sup>。

シリコン表面に形成した酸化膜は、半導体素子の製造において拡散のマスクとして用いられる。このシリコン基板上に形成した酸化膜は、基板と酸化膜との境界付近に歪を生じる<sup>16)17)</sup>。これはシリコン基板と酸化膜との熱膨張係数の差に起因するものである。酸化膜の所定部分を取り除いて、拡散の窓あけをすると、歪は窓の中心方向に緩和されることが予想される。一方、拡散は応力のこう配により、増加した空孔の働きで増速することが知られている<sup>18)19)</sup>。ここで、拡散は弾性変形によって増速されるのではなく、塑性変形によって増速される。したがって、窓の部分に不純物拡散を行っている際に、転位の移動により応力緩和が生じれば拡散の不純物分布は不均一となる。

本研究では、シリコン基板上に形成された、マスクとなる酸化膜端における機械的圧力のために増速拡散が起きることを明らかにする<sup>14)15)20)</sup>。

光によるなだれ増倍現象は pn 接合の隆伏電圧に大きく依存している。よって、受光面全体のなだれ増倍分布を観察することにより、pn 接合の不純物分布を詳細にとらえることが可能である。この方法が高感度であることを簡単なモデルを用いて次に示す。半導体基板中の不純物濃度  $N$  となだれ増倍係数  $M$  は近

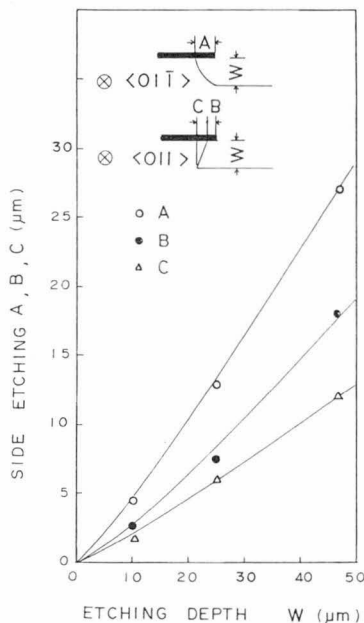


図 9.3 サイドエッチング量

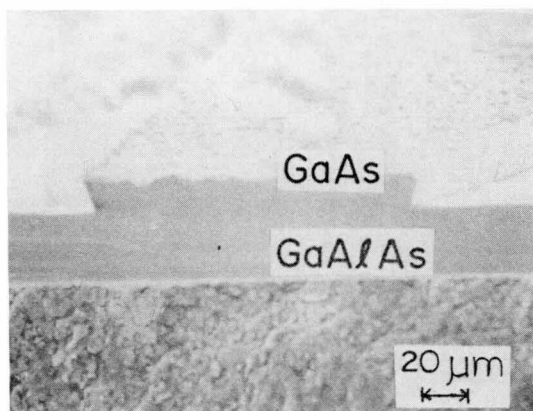


図 9.4 選択エッチング

似的に次式で表わされる<sup>21)</sup>。

$$(1/M)(dM/M) \cong dN/N.$$

$M = 100$  の場合、 $dM/M = 0.1$  に対して、 $dN/N = 0.001$  となり、このなだれ増倍分布の変化が不純物分布の変動に対して非常に敏感であることがわかる。

### 9.2.2 実験

図 9.5 に示す 2 種類の試料を準備した。(a) に示す試料 A はイオン注入のマスクとして  $0.6\mu\text{m}$  の厚さの酸化膜を用い、イオン注入される部分は  $0.1\mu\text{m}$  の酸化膜で覆われている。(b) に示す試料 B は全体を  $0.1\mu\text{m}$  の酸化膜で覆い、イオン注入のマスクとしてホトレジストを用いた。エピタキシャル層 ( $\pi$  層) の厚さは  $30\mu\text{m}$ 、不純物濃度は  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  である。この試料に  $\text{B}^+$  イオンを加速電圧  $50 \text{ kV}$ 、注入量  $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  で注入を行なった。

次に歪による増速拡散をおこなうために、 $1150^\circ\text{C}$  で 9 時間の熱処理を行った。最後に、比較的低い温度 ( $1000^\circ\text{C}$ ) で短時間 (1 時間) の拡散を行って  $\text{n}^+$  層を形成して、アラバンシュホトダイオード (APD) を製作した。作製したダイオードにおいては、降伏電圧の低い  $\text{n}^+ \text{p}$  接合の外側に降伏電圧の高い  $\text{n}^+ \pi$  接合が形成されている。 $\text{n}^+ \pi$  接合は、内側の円形部に形成された  $\text{n}^+ \text{p}$  接合の光によるなだれ増倍現象を観察する際にガードリングの役目をする。

### 9.2.3 結果

作製した APD の降伏電圧は  $150 \text{ V}$  であった。APD を降伏電圧直前までバイアス電圧を印加して微少な光スポット (白色光、直径  $20\mu\text{m}$ ) で受光面全体を走査して増倍率分布像を観測した。

平均増倍率  $\bar{M} = 100$  における増倍率分布像を試料 A について図 9.6(a) に、試料 B について図 9.6(b) に示す。ここで増倍率  $M$  は低電圧 ( $V_R = 20 \text{ V}$ ) 時の光電流に対する印加電圧時の光電流であり、受光面の位置により増倍率が異なるので、平均増倍率  $\bar{M}$  として表わされている。

また平均増倍率  $\bar{M} = 10, 50, 100$  における増倍率分布を試料 A について図 9.7(a) に、試料 B について図 9.7(b) に示す。

試料 B は均一な増倍率分布を示し、均一な接合が形成されていることを示している。これに対して試料 A においては受光面の中央部に比べ周辺部の増倍率が異常に高くなっている。

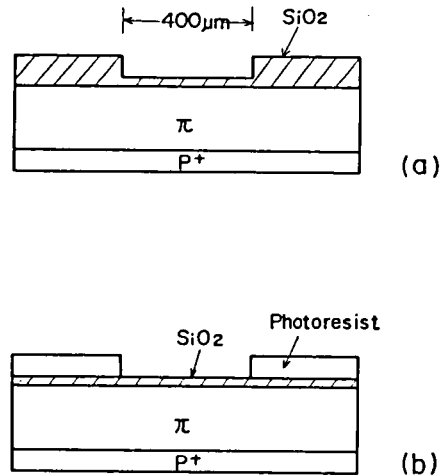
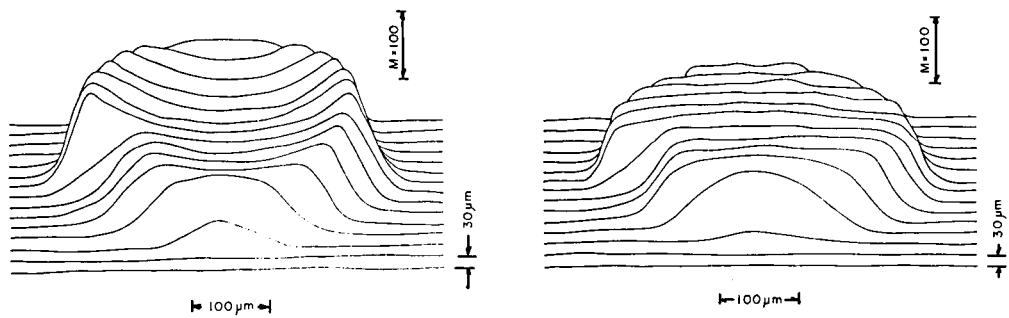


図 9.5 実験に用いた試料

(a) 試料 A、酸化膜マスク

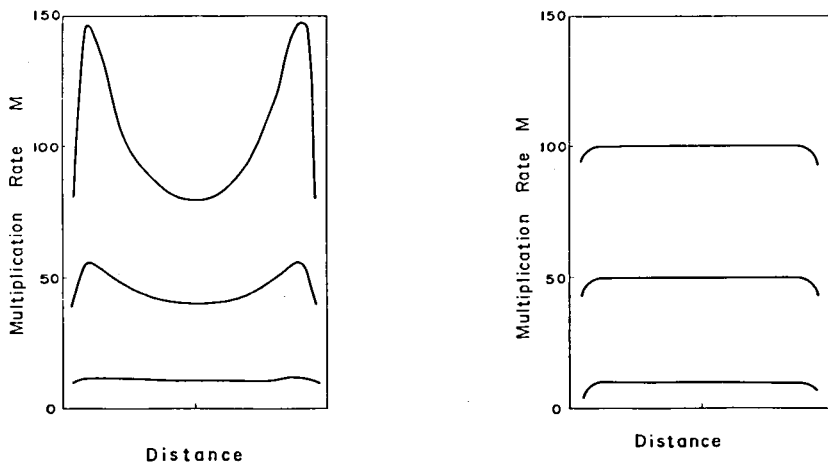
(b) 試料 B、レジストマスク



(a) 試料A

(b) 試料B

図 9.6 APDの増倍率分布像



(a) 試料A

(b) 試料B

図 9.7 APDの増倍率分布 (M = 10、50、100)

試料Aにおいて受光面の中央部に比べ周辺部の増倍率が異常に高くなっている原因としては、(1)エッジブレイクダウン、(2)酸化膜中への不純物の再分布、(3)酸化膜の圧力による禁制帯巾の変化、(4)酸化膜によるひずみが拡散に及ぼす影響などがあげられる。

(1)についてはイオン注入のマスク以外は試料Aと全く同じ工程で作られ同じガードリングを持つ試料Bにおいてエッジブレイクダウンがおきていないので原因とは考えられない。(2)については酸化膜の厚さの違いにより不純物の再分布は異なるとしてもその影響は酸化膜の厚さの異なる境界付近に限られるはずであり、受光面の中央部付近にまで影響を及ぼすことは考えられない。

(3)については以下に計算を行って数値を検討してみる。Si 中の最大応力  $\sigma_s(\max)$  は酸化膜の応力を  $\sigma_f$  とすると<sup>22)</sup>、

$$\sigma_s(\max) = -4\sigma_f(t_f/t_s) \quad (9.1)$$

で与えられる。ここで  $t_f$  は酸化膜の膜厚、 $t_s$  は Si ウェハの厚さである。応力  $\sigma_s$  と禁制帯巾の変化  $\Delta E_g$  は Si のストレステンソルが、

$$\sigma \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \frac{\sigma}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \frac{\sigma}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

のとき<sup>(23)</sup>、

$$\Delta E_g = -10 \times \sigma \text{ (eV} \times 10^{-12} \text{ cm}^2 / \text{dyn)} \quad (9.2)$$

の関係がある。また禁制帯巾  $E_g$  と降伏電圧  $V_B$  との関係は<sup>(24)</sup>、

$$V_B \simeq 60 \left( \frac{E_g}{1.1} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-\frac{3}{4}} \quad (9.3)$$

で表わされる。

いま  $t_f = 0.6 \mu\text{m}$ 、 $t_s = 200 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_f = 5 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ 、 $N_B = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  を式 9.1 ~ 9.3 に代入して降伏電圧  $V_B$  の圧力による変化分  $\Delta V_B$  を求めると、

$$\Delta V_B = 0.1 \text{ V}$$

となる。降伏電圧  $V_B = 150 \text{ V}$  において  $0.1 \text{ V}$  の変化分があるとして増倍率の変化は微小であり、図 9.6 (a)の実験結果ほど増倍率分布に異常をもちこすことはない。

以上の考察から増倍率分布の異常は(4)の原因すなわち酸化膜の段差の個所で生じるひずみが拡散に影響を及ぼして生じると考えられる。

9.2.4 ではひずみによる増速拡散について考察を行う。

#### 9.2.4 考 察

ひずみの分布により拡散係数が変化してその結果、なだれ増倍が不均一になるというモデルを考えて解析を行う。始めに増倍率  $M$  と拡散係数との関係を求める。

イオン注入とそれに続く熱拡散の結果生じる不純物濃度分布について考える。注入イオンの分布は<sup>(25)</sup>、

$$C(y) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \langle \Delta R_p \rangle} \exp \left\{ -\frac{(y - \langle R_p \rangle)^2}{2 \langle \Delta R_p \rangle^2} \right\} \quad (9.4)$$

で表わされる。ここで  $Q$  は単位面積あたりの注入イオン量、 $\langle R_p \rangle$  は注入方向に投影した注入イオンの飛程の平均値、 $\langle \Delta R_p \rangle$  はその標準偏差である。

加速電圧  $50 \text{ kV}$  でボロンのイオン注入を行う場合、Si および  $\text{SiO}_2$  に対する  $\langle R_p \rangle$  および  $\langle \Delta R_p \rangle$  は、 $\langle R_p \rangle = 1600 \text{ \AA}$ 、 $\langle \Delta R_p \rangle = 500 \text{ \AA}$  である。よって  $1000 \text{ \AA}$  の酸化膜をとおしてイオン注入を行い、その後熱拡散を行う場合は、Si の表面すなわち  $y = 0$  に単位面積あたり  $Q$  の不純物が存在するとしてその拡散を考えるのはよい近似である。その場合  $t$  時間後の不純物濃度分布は、

$$C(y) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{y^2}{4Dt}\right) \quad (9.5)$$

となる。ここで  $y$  軸の原点を  $n^+$  層の深さ  $x_j$  に変更する。その場合、拡散後の不純物濃度分布  $N(y)$  は、 $\pi$  層のイオン注入前の不純分濃度を  $N_B$  として、

$$N(y) = C(y + x_j) + N_B \quad (9.6)$$

となる。

一方電界  $E$  は、

$$E = \frac{q}{\epsilon} \int_0^y N(y) dy \quad (9.7)$$

で与えられる。ここで  $q$  は電子の電荷、 $\epsilon$  は誘電率である。印加電圧  $V$  は空乏層巾を  $W$  として

$$V = \int_0^W E dy \quad (9.8)$$

となる。

また位置  $y$  における増倍率  $M$  は電子の注入によりアバランシェ増倍が開始される場合<sup>26)</sup>、

$$M = \frac{\exp\left[-\int_y^W (\alpha - \beta) dy\right]}{1 - \int_0^W \alpha \exp\left[-\int_y^W (\alpha - \beta) dy\right] dy} \quad (9.9)$$

となる。なだれ領域中で光生成されるキャリアがなく、正孔電流の注入がない場合には、増倍率  $M$  は、

$$M = M(W) \quad (9.10)$$

となる。ここで電子のイオン化係数  $\alpha$ 、正孔のイオン化係数  $\beta$  は電界の関数であり、次式で表わされる<sup>24)</sup>。

$$\alpha = 3.8 \times 10^8 \exp(-1.75 \times 10^6 / E)$$

$$\beta = 2.25 \times 10^7 \exp(-3.26 \times 10^6 / E) \quad (9.11)$$

式 9.4 ~ 9.11 によって拡散定数と増倍率分布の関係を導くことができた。よって図 9.7 (a) に示す受光面における増倍率分布より  $p$  層拡散時のボロンの拡散定数の受光部における分布を計算することができる。

実際に作製した素子の数値を計算に用い、

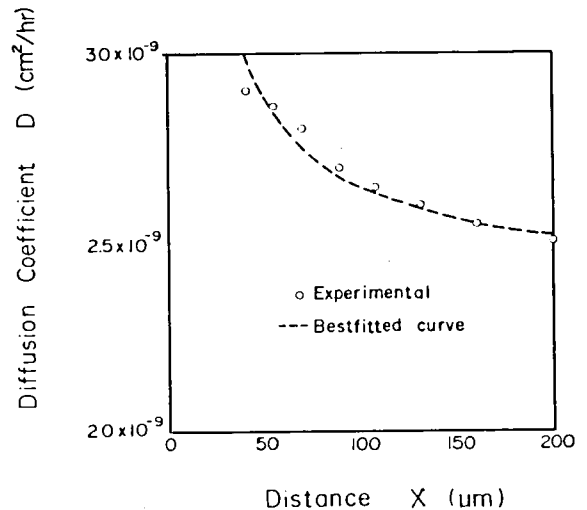


図 9.8 拡散定数の位置による変化

$C_B = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 、 $Q = 4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、 $t = 9 \text{ hr}$ 、 $n^+$  層の厚さ  $x_j = 0.3 \mu\text{m}$  とした。図 9.7(a) の実験値より計算して求めたボロンの拡散定数  $D$  と位置  $x$  の関係を図 9.8 に示す。ここで  $x$  軸は酸化膜の段差のある個所を原点として Si 表面にそって円の中心にむかって座標軸を定めた。

図 9.8 において点線はカーブフィッティングによって求めた実験式

$$D = D_0 + k/x \quad (9.12)$$

を表わしており、 $D_0 = 2.4 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{h}$ 、 $k = 2.4 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{h}$  である。この  $D_0$  の値はひずみのない定常状態における、B の  $1150^\circ\text{C}$  の拡散定数  $D = 2.5 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{h}$  <sup>27)</sup> に一致している。この一致は、 $x \rightarrow \infty$  の場合、式 9.12 がひずみのない定常状態に帰結することを考えると当然の結果である。すなわち、第 1 項はひずみのない定常状態における拡散定数であり、一方第 2 項は酸化膜によって生じるひずみの拡散定数への寄与を表わしている。

図 9.8 において距離  $x$  が大きくなると拡散定数  $D$  が減少するのは、 $x$  が大きくなると応力  $\sigma$  が減少することによる。円形の窓の内側における応力  $\sigma$  は近似的に次式で与えられる <sup>22)</sup>。

$$\sigma \propto 1/x \quad (9.13)$$

ひずみが発生した場合、そのひずみを緩和するために空孔が生じ、空孔による増速拡散がおきると考えると、その拡散定数  $D$  は

$$D = D_0 + D_v \quad (9.14)$$

で表わされる <sup>28)</sup>。ここで  $D_v$  は空孔による増速拡散の拡散定数への寄与を表わし、ひずみに関して増加関数である。式 9.12 を式 9.13、式 9.14 を比べることにより、不純物の拡散が厚い酸化膜から窓の中心に向かって分布する、ひずみによって増速されると結論することができる。

### 9.2.5 ま と め

拡散のマスクとして用いる酸化膜に起因したひずみにより生じる増速拡散について述べた。

シリコンアバランシュホトダイオードを製作して、受光面全体のなだれ増倍分布像を観察することにより、拡散のために設けた酸化膜の窓に不均一な拡散が生じていることを見出した。この結果を定量的に解析することにより、拡散係数がひずみのない定常状態の項と酸化膜によって生じるひずみによる項との和で表わされることを明らかにした。



参 考 文 献 (プロセス)

- (1) 榎本龍也, 阿部東彦, “ドライプロセス”, 電子通信学会誌, vol.62, no.4, pp. 404-409, April 1979.
- (2) H. Komiya, "Plasma etching in microfabrication," Proc. of 1st Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, 1977, pp.571-574.
- (3) R. Kumar, C. Ladas, and G. Hudson, "Characterization of plasma etching for semiconductor applications," Solid State Technol., pp.54-59, Oct. 1976.
- (4) R.A.H. Heinecke, "Control of relative etch rates of SiO<sub>2</sub> and Si in plasma etching," Solid State Electron., vol.18, no.12, pp.1146-1147, Dec. 1975.
- (5) J.A. Bondur, "Dry process technology (reactive ion etching)," J. Vac. Sci. Technol., vol.13, no.5, pp.1023-1029, Sept./Oct. 1976.
- (6) H.A. Clark, "Plasma processing at moderate vacuum," Solid State Technol., pp.51-54, June 1976.
- (7) H. Abe, K. Nishioka, S. Tamura, and A. Nishimoto, "Micro-fabrication of anti-reflective chromium mask by gas plasma," Japan. J. Appl. Phys., vol.15, Supplement 15-1, pp.25-31, 1976.
- (8) H. Abe, "The application of gas plasma to the fabrication of MOS LSI," Suppl. J. Jpn. Soc. Appl. Phys., vol.44, pp.287-295, 1975.
- (9) W.H. Legat and H. Schilling, "Plasma etching of metal films in the fabrication of large-scale integrated circuits," Electrochem. Soc. Meeting Abstr. 75-2, no.130, 1975.
- (10) 前田和夫, 藤野勝裕, “ガスプラズマ技術による金属薄膜のパターニング”, 電気化学, vol.43, no.1, pp.22-27, Jan. 1975.
- (11) R.G. Poulsen, H. Nentwich, and S. Ingrey, "Plasma etching of Aluminium," 1975 IEEE IEDM Tech. Digest, Abstr. 9.4., 1976.
- (12) 戸所義博, 加藤剛太, 寺本 巖, “プラズマエッチングを用いた GaAs の選択エッチング”, 第89回応用物理学会講演予稿集, 4a-E-6, 1978.

- (13) 井上森雄, 大熊 徹, 三井健二, 戸所義博, “プラズマエッチングの半導体プロセスへの応用”, 結晶加工と評価技術第145委員会・応用物理学会結晶工学分科会合同研究会資料, pp.25-33, 1979.
- (14) 戸所義博, 寺本 巖, “Si アバランシエホトダイオードの増倍率分布”, 電子通信学会技術研究報告, 電子デバイス研究会, ED 77-44, pp.29-34, 1977.
- (15) 戸所義博, “光ファイバ通信用受光素子”, National Tech. Rept., vol. 25, no.6, pp.1170-1179, Dec. 1979.
- (16) R. Glang, R.A. Holmwood, and R.L. Rosenfeld, "Determination of stress in films on single crystalline silicon substrate," Rev. Sci. Instrum., vol.36, no.1, pp.7-10, Jan. 1965.
- (17) G.H. Schwuttke and J.K. Howard, "X-ray stress topography of thin films on germanium and silicon," J. Appl. Phys., vol.39, no.3, pp.1581-1591, Feb. 1968.
- (18) S. Prussin, "Generation and distribution of dislocations by solute diffusion," J. Appl. Phys., vol.32, no.10, pp.1876-1881, Oct. 1961.
- (19) J.E. Lawrence, "Behavior of dislocations in silicon semiconductor devices: diffusion, electrical," J. Electrochem. Soc., vol.115, no.8, pp.860-865, Aug. 1968.
- (20) Y. Todokoro and I. Teramoto, "The stress-enhanced diffusion of boron in silicon," J. Appl. Phys., vol.49, no.6, pp. 3527-3529, June 1968.
- (21) L.J.M. Bollen, J.J. Goedbloed, and E.T.J.M. Smeets, "The avalanche photodiode," Philips Tech. Rev., vol.36, no.7, pp.205-210, July 1976.
- (22) J.M. Fairfield and G.H. Schwuttke, "Strain effects around planar diffused structures," J. Electrochem. Soc., vol.115, no.4, pp.415-422, April 1968,
- (23) J.J. Wortman, J.R. Hauser, and R.M. Burger, "Effect of mechanical stress on p-n junction device characteristics," J. Appl. Phys., vol.35, no.7, pp.2122-2131, July 1964.
- (24) S.M. Sze and G. Gibbon, "Avalanche breakdown voltages of abrupt and linearly graded p-n junctions in Ge, Si, GaAs, and GaP," Appl. Phys. Lett., vol.8, pp.111-113, Apr. 1968.

- (25) J. Lindhald, M. Scharff, and H.E. Schiott, "Range concepts and heavy ion ranges," Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., vol.33, no.14, pp.3-42, 1963.
- (26) R.J. McIntyre, "Multiplication noise in uniform avalanche diodes," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-13, no.1, pp.164-168, Jan. 1966.
- (27) A.M. Smith, RTI Report ASD-TDR-63-316, p.4, 1964.
- (28) G.J. Diens and A.C. Damask, "Radiation enhanced diffusion in solids," J. Appl. Phys., vol.29, no.12, pp.1713-1721, Dec. 1958.

## 第 10 章 サブミクロンマスクの製作

### 1 0.1 はじめに

半導体集積回路においては、パターン寸法の微細化が精力的に進められており、リソグラフィ技術はその中心的役割をはたしている。最近では、従来のホトリソグラフィに対して、X線露光法<sup>1)</sup>、電子ビーム露光法などの新しいリソグラフィ技術について研究開発が各方面で進められている。このような状況を見ると、従来のホトリソグラフィは、今後、X線や電子ビームにとってかわられてしまうような感があるが、現実の問題として経済性や量産性を考えた場合には、遠紫外線露光<sup>2)</sup>をも含めたホトリソグラフィは、今後とも重要な技術として生きのびてゆくものと思われる。

このホトリソグラフィに必要なマスクを製作するために、電子ビーム露光技術が用いられ、実用化の段階をむかえている。現在のところでは、主としてパターンルールが $2\sim 3\mu\text{m}$ のマスクを製作するために電子ビーム露光が用いられている<sup>3)-5)</sup>。

これに対して、電子ビーム露光の微細加工性を特に生かして、 $1\mu\text{m}$ からサブミクロン領域のパターンを含むマスクの製作に電子ビーム露光技術を用いることが考えられる。その場合には、サブミクロンマスクを製作するという技術的問題に加えて、サブミクロンマスクの光によるパターン転写の問題に注意を払う必要がある。

本章では電子ビーム露光を用いたサブミクロンマスクの製作について述べる<sup>6)7)</sup>。

サブミクロンマスクの製作にあたっては、電子ビーム露光装置の中で描画速度の比較的遅い装置を有効に利用するために、新しく2段階電子ビーム露光法を導入して、パターンの高精度化、微細化と経済性の両立を図った。またウェットエッチングに変えてドライエッチングを採用することにより、微細マスクパターン寸法の高精度化を達成した。以下に、2段階電子ビーム露光法、ドライエッチングおよびサブミクロンマスクの製作結果について述べる。

### 1 0.2 2段階電子ビーム露光法

微細パターン描画用で、描画速度の比較的遅い電子ビーム露光装置を用いてマスクを製作する場合は、描画に長時間を要し、さらにその間に装置の動作状態が変動し描画精度が低下するという問題が生じてくる。これを解決するひとつの方法として、2段階電子ビーム露光法を用いてサブミクロンマスクの製作を行った。

図1 0.1にその概略を示す。第1段階として、微細パターンの描画が困難であるが、描画速度の速い電子ビーム露光装置を用いて描画すべき全パターンのうちまず大きなパターンを描画し、この際に第2段階露光において必要なL字形の合せマークも同時に描画しておく(図10.1(a))。その後、通常の処理工程をへて第1段階のマスクができあがった後、第2段階として再度レジストを塗布して、微細パターン描画用露光装置により、第1段階で形成した合せマークを検出して位置合せを行い、残っている微細パターンを描画する(図10.1(b))。現像後、ドライエッチングにより金属膜を除去し、微細パターンを形成してマスクができあがる。なお、第1段階での電子ビーム露光のかわりに光露光を用いることもできる。以下の実

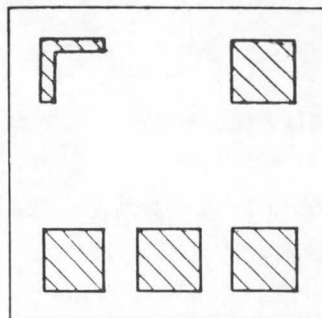
験には、第1段階および第2段階の露光にそれぞれ電子ビーム露光装置JBX-6A および JBX-5A（ともに日本電子製）を用いた。

通常のクロムハードマスクまたは低反射クロムハードマスクの中に、他のパターンと同時にエッチングによって形成されたマーク用パターンから、マーク検出のための十分な信号がえられる。図10.2に信号電流波形を示す。新たにマスク上に金属を蒸着してマーク検出用のパターンを形成する必要はない。

2段階電子ビーム露光法においては、パターン精度の向上および描画時間の短縮がなされるが、一方、露光、現像、エッチングの各工程が2回となり、工程数が増加する。1セットのマスクの中でサブミクロンパターンを必要とするマスクは、通常ゲート、エミッタ、コンタクトパターン形成などに限定され、数が少ないので、1セットのマスク全体の製作時間を考えると、描画時間短縮の効果は非常に大きく、総合的に判断すると工程数の増加分を十分に補うことができる。

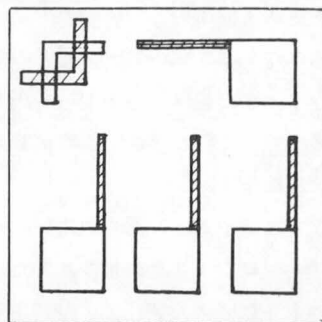
第2段階の電子ビーム露光においてサブミクロンパターンを形成するために用いるレジストは解像度の高いポジ形レジストのみでよい。その理由は、図10.3(c)のようなパターンを形成する場合には、第1段階でネガレジストを用いて(a)に示すパターンを形成し、第2段階でポジレジストを用いて(b)に示すようにパターニングすることにより、所望のパターンを形成することができるからである。

#### FIRST STEP EB LITHOGRAPHY



(a) 第1段階における露光

#### SECOND STEP EB LITHOGRAPHY



(b) 第2段階における露光

図10.1 2段階電子ビーム露光の説明図(1)

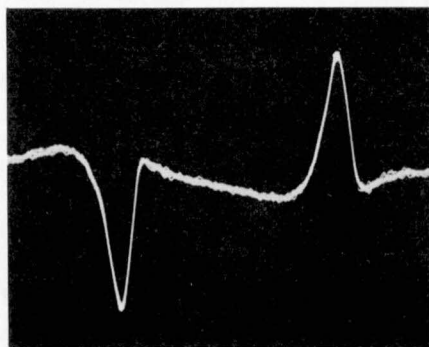


図10.2 マーク検出信号波形

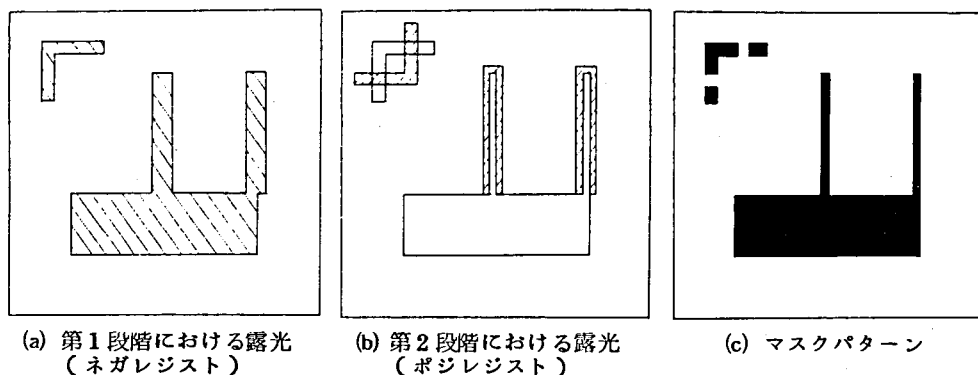


図 10.3 2段階電子ビーム露光の説明図(II)

なお、図 10.3 (b) のようにガラス基板上に金属膜の一部が孤立して残るパターンでは、導電性透明膜つきガラス基板を用いる。しかし、図 10.1 に示すような、金属膜がすべて連なっているパターンでは、導電性透明膜つきガラス基板は必ずしも必要ではなく、通常ガラス基板を用いて露光することができる。

サブミクロンマスクの製作においては、感度だけではなく解像度も問題となり、またドライエッチングを前提にすれば耐ドライエッチング性も重視する必要がある。表 3.1 に示すレジストについて予備的な検討を行ったが、高感度レジストを使うまでにいたらず、サブミクロンマスクの製作には感度は低い解像度が高く、使いやすい PMMA を用いた。近接効果補正については露光実験によりえられた値を用いて形状による補正を行った。

PMMA 使用上の問題点はやはり感度が低いことであり、たとえ 2 段階電子ビーム露光法により描画面積を小さくしても、描画にかなりの時間を要するのは避けられない。しかも耐ドライエッチング性についても満足できるものではない。高感度、高解像度で、耐ドライエッチング性の高い、その上使いやすいポジ形レジストの開発が望まれる。

### 10.3 ドライエッチング

ドライエッチングはウェットエッチングに比べて多くの工程上の長所を持っており、特に微細パターンを形成するのに適した方法である。ホトレジストを用いたクロムハードマスクの製作においてもエッチングのドライ化が進められている<sup>(8)</sup>。しかし、電子ビームレジストは、ホトレジストに比べて耐ドライエッチング性が低いため電子ビーム露光によるマスクの製作にはウェットエッチングが一般に用いられている。本節では、電子ビームレジストと Cr、 $\text{Cr}_x\text{O}_y$  のエッチング速度を求め、電子ビームマスク製作のドライ化を検討した。

ドライエッチングを行うために用いるプラズマエッチング装置には大別すると円筒型と平行平板

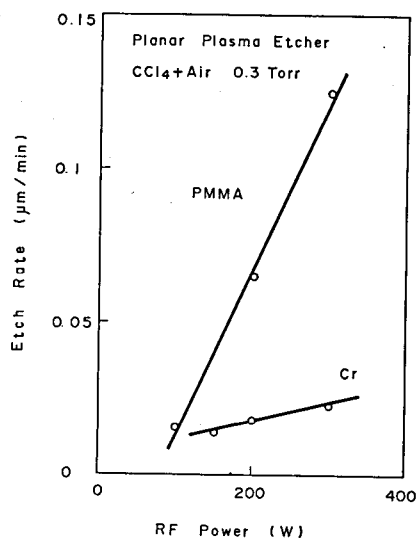


図 10.4 PMMA と Cr のエッチング速度

型とがある。この2つの方式の装置についてクロムのエッチング実験を行った。

始めに平行平板型装置（アネルパ製 DEM 451）における実験結果を述べる。図10.4にPMMAとCrのエッチング速度を示す。用いたエッチングガスは $\text{CCl}_4 + \text{Air}$ 、圧力は0.3 Torrである。図から明らかに、PMMAのような電子ビームレジストを用いると、そのエッチング速度が大きく、したがって平行平板型装置によってCrをエッチングすることは難しい。

次に円筒型装置（LFE製 PFS/PCrE/PDS 501）を用いた実験結果について述べる。図10.5にPMMAのエッチング速度を示す。斜線部下側の曲線が3インチマスク中央部におけるPMMAのエッチング速度を、上側の曲線が3インチマスク最外周部におけるエッチング速度を示す。なおエッチングガスは $\text{C}_2\text{HCl}_3 + \text{O}_2$ 、圧力は4 Torrである。円筒型装置においては平行平板型装置に比べてレジストのエッチング速度は小さい。

図10.6に3インチの $\text{Cr}_x\text{O}_y/\text{Cr}$  マスクブランク、Cr マスクブランク全面のエッチングに要する時間を示す。ここで $\text{Cr}_x\text{O}_y$ 層の厚さは $250 \text{ \AA}$ 、Cr層の厚さは $750 \text{ \AA}$ である。図10.5、図10.6よりCr マスクブランク全面をエッチングした時点でのレジストの膜べりを求めることができる。レジスト膜べりの高周波出力に対する依存性を図10.7に示す。高周波出力が350 Wのとき膜べりは最小となる。なお、Cr マスクブランク全面エッチング時点でのレジスト膜べりは、圧力にはほとんど依存しなかった。4インチの $\text{Cr}_x\text{O}_y/\text{Cr}$  マスクブランク全面のエッチングに要する時間は約12分である。

2段階電子ビーム露光法の場合は、被エッチング部の面積が小さいため、ドライエッチングに要する時間はより短くなる。

一般に円筒型装置ではエッチングが等方的に進行するため、サイドエッチングが生じ、微細加工の精度が低くなる。しかし、この実験のように $0.1 \mu\text{m}$ 程度のCr膜をエッチングする場合は、膜厚が薄いためサイドエッチング量は小さい。図10.8にドライエッチングにより $0.7 \mu\text{m}$ パターンを形成したCrブランクの断面SEM写真を示す。

(a)はエッチング後レジスト除去前、(b)はレジスト

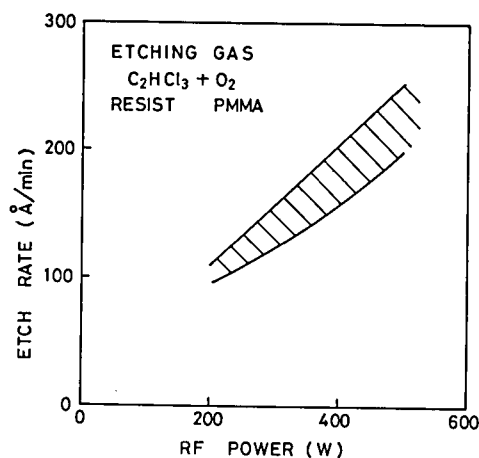


図10.5 レジストのエッチング速度  
(円筒型プラズマエッチング装置)

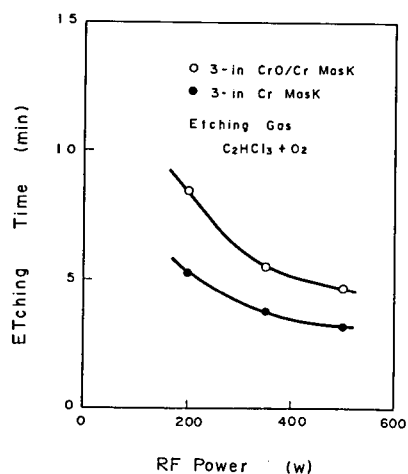


図10.6 Cr マスクブランクのエッチング時間  
(円筒型プラズマエッチング装置)

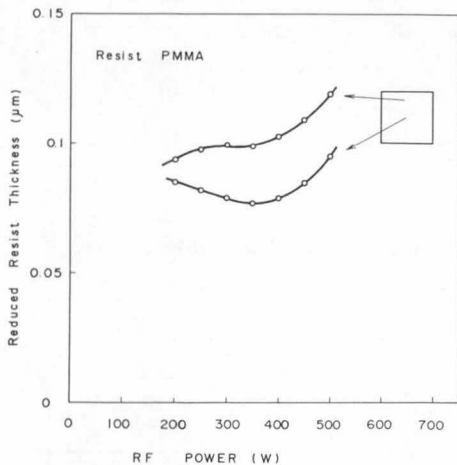


図10.7 レジストの膜べり（円筒型プラズマエッチング装置）

除去後の写真である。図10.9に $0.3\mu\text{m}$ パターンを形成したCrブランクの断面SEM写真を示す。このようにパターン幅の小さいマスクは、現在のホトリソグラフィ技術では転写できないわけであるが、ここではマスク製作微細化の限界をきわめる意味で試作を行った。

円筒型装置において生じるもうひとつの問題として、エッチングがマスクの最外周部より進行していくために、マスク外周部とマスク中央部とでサイドエッチ量が異なることがあげられる。しかし、エッチング時間が短い場合は膜べりが小さく、パターン寸法の誤差は後に述べるように小さい。

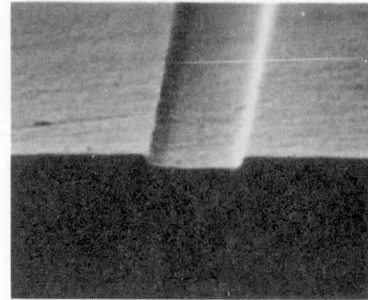
#### 10.4 サブミクロンマスクの製作結果

図10.10に作製したマスクパターンの透過光による顕微鏡写真を示す。(a)はゲート形成用パターンでゲート長は $0.7\mu\text{m}$ である。(b)は遠紫外線露光実験用テストパターンで、 $0.4\sim 1\mu\text{m}$ のラインアンドスペースを示す。

図10.10(a)に示したマスクについて設計値 $0.7\mu\text{m}$ に対するできあがり寸法のマスク面内における分布を図10.11に、平均と標準偏差を表10.1に示す。パターン幅は中央部がやや狭く、周辺部が広がっているが、設計値に対して $\pm 0.07\mu\text{m}$ 以内に抑えられている。



(a) ドライエッチング後



(b) レジスト除去後

図10.8 Cr マスクブランクの断面 SEM 写真 I

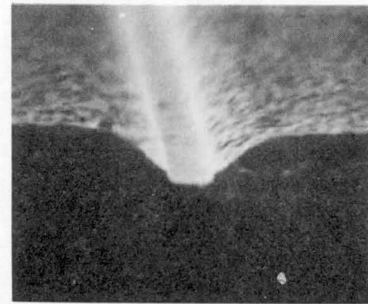
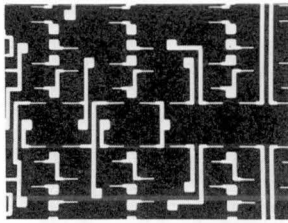
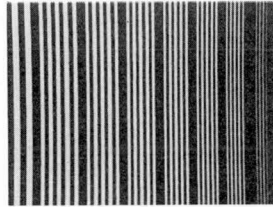


図10.9 Cr マスクブランクの断面SEM写真 II





(a) ゲートパターン



(b) ラインアンドスペース

図 10.10 試作マスクパターン

第2段階で描画したパターンの第1段階で描画したパターンに対する重ね合せの測定結果を表 10.2 に示す。3 インチマスク A、B、C について、25 チップを測定し、x 方向の平均  $\overline{\Delta x}$  と標準偏差  $\sigma_x$ 、y 方向の平均  $\overline{\Delta y}$  と標準偏差  $\sigma_y$  を求めた。重ね合せのずれは平均として  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  以内、標準偏差は  $0.04 \mu\text{m}$  程度でいずれも小さい。

### 10.5 まとめ

電子ビーム露光とドライエッチングを用いて高精度のサブミクロンマスクを製作できることを明らかにした。

今後の問題としては、露光時間をより短縮し、ドライエッチングにおけるクロムとレジストのエッチレート比をより大きくすることがあげられる。そのためにはポジ形としてより高性能なレジストの出現が待ち望まれる。すなわち、高感度、高解像度で使いやすく、耐ドライエッチング性の高いポジ形電子ビームレジストが必要である。そのような高性能レジストが現われれば、それに適したドライエッチング方法が開発され、パターン精度がより向上するはずである。

サブミクロンマスクの適用例としては、超高周波用シリコントランジスタや GaAs FET などのディスクリット半導体素子、分周器などの集積度のあまり高くない GaAs IC、あるいは表面弾性波素子などが考られる。その場合、コンタクト方式の露光装置を使用するという観点から量産規模や許容される欠陥密度、チップサイズなどいろいろな角度から検討していく必要がある。

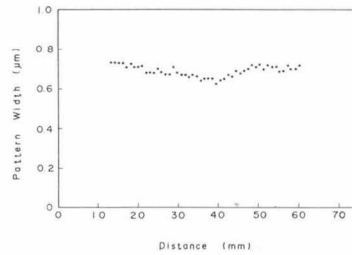


図 10.11 マスク面内における線幅の分布

表 10.1 パターン幅の測定結果

設 計 値	測 定 値 W L	標 準 偏 差 $\sigma$
1.2	1.23	0.031
1.2	1.18	0.028
0.7	0.67	0.038
0.7	0.68	0.032

表 10.2 2段階電子ビーム露光における重ね合せ  
(単位:  $\mu\text{m}$ )

マ ス ク	$\overline{\Delta x}$	$\sigma_x$	$\overline{\Delta y}$	$\sigma_y$
A	0.020	0.033	0.054	0.029
B	0.023	0.042	0.035	0.029
C	0.028	0.039	0.049	0.031

参 考 文 献

- (1) D. Maydan, "X-ray lithography for microfabrication," J. Vac. Sci. Technol., vol.17, no.5, pp.1164-1168, Sept./Oct. 1980.
- (2) B.J. Lin, "Deep UV lithography," J. Vac. Sci. Technol., vol.12, no.6, pp.1317-1320, Nov./Dec. 1975.
- (3) R.F.W. Pease, J.P. Ballantyne, R.C. Henderson, A.M. Voshchenkov and L.D. Yau, "Applications of the electron beam exposure system," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-22, no.7, pp.393-399, July 1975.
- (4) C.H. Ting, R.L. Anderson, D.Y. Saiki, and A.J. Kraft, "Chrome mask fabrication with electron-beam lithographic system," J. Vac. Sci. Technol., vol.15, no.3, pp.948-952, May/June 1978.
- (5) S. Okazaki, K. Mochiji, E. Takeda, and Y. Maruyama, "Electron beam mask fabrication for MOSLSI's with 1.5  $\mu\text{m}$  design rule," Japan, J. Appl. Phys., vol.19, Supplement 19-1, pp.51-55, 1980.
- (6) 戸所義博, "電子ビーム描画によるサブミクロンマスクの製作", 電子材料, 3月号, PP. 25-30, 1981.
- (7) 戸所義博, 武田節子, 中川正信, "電子ビーム露光とドライエッチングによるサブミクロンマスクの製作", 第41回応用物理学会講演予稿集, 19P-E-13, 1980.
- (8) H. Abe, K. Nishioka, S. Tamura, and A. Nishimoto, "Micro-fabrication of anti-reflective chromium mask by gas plasma," Japan. J. Appl. Phys., vol.15, Supplement 15-1, pp.25-31, 1976.

## 第 11 章 デバイス製作への応用

### 11.1 はじめに

電子ビーム直接露光技術は、

- (1) 高解像性：サブミクロン領域の微細パターンを高精度で描画することができる。
- (2) 高精度の重ね合せ：電子ビームにより、マークを走査して重ね合せを行うので、ウェハの変形にも対処でき重ね合せ精度が高い。
- (3) 低欠陥：マスクを使用しないため、マスクを用いる他のリソグラフィ技術に比べて欠陥密度が低い。
- (4) ターンアラウンド時間の削減：ウェハ上に直接パターンが描画されるため、回路パターンの変更に迅速に対処でき、製品開発期間が短縮される。
- (5) 多品種少量生産：マスタースライス方式などの多品種少量生産に適した技術である。

などの長所を持っており、このような特長を生かして電子ビーム直接露光技術を用いて、いろいろなデバイスが製作されている。

LSI の分野では、最小線幅が  $1\mu\text{m}$  の超 LSI が試作されている<sup>1)~10)</sup>。一方、超高周波素子を実現するために、電子ビーム直接露光技術を用いてサブミクロンパターンが描画されており、GaAs FET<sup>11)~17)</sup>、GaAs IC<sup>18)~19)</sup> に応用されている。その他、磁気バブル<sup>20)</sup>、ジョセフソン素子<sup>21)</sup>、表面弾性波素子<sup>22)</sup>、光デバイス<sup>23)</sup> などへの応用例がある。

本章では、電子ビーム直接露光を用いた、Xバンド帯低雑音 GaAs FET の製作について述べる。

### 11.2 GaAs FET の構造と動作原理

一般に GaAs FET では、Si において通常用いられている MOS 構造ではなく、ショットキーゲート電極を用いて空乏層幅を変化させ、ドレインからソースへ流れる電流を制御する。図 11.1 に GaAs FET の構造の一例を示す。

半絶縁性基板の上に不純物濃度の低いバッファ層、続いて n 型活性層をエピタキシャル成長により形成する。 $n^+$  層は、エピタキシャル成長またはイオン注入により形成する。ゲート部分の活性層をはりこむ図のような構造は、リセス構造と呼ばれる。L は

ゲート長、 $R_s$  はソース抵抗を表わす。

GaAs FET の高周波特性を向上させ、低雑音化を図るために重要なことは以下の 2 点である。

- (1) 活性層のキャリア密度分布の最適化、結晶特性の向上。
- (2) ゲート・ソース間容量  $C_s$ 、ソース抵抗  $R_s$ 、ゲート抵抗  $R_g$  の低減と相互コンダクタンス  $g_m$  の増大。

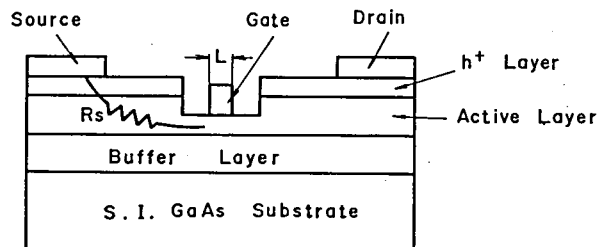


図 11.1 GaAs FET の構造

$R_s$ を減らすために、 $n^+$ 層が形成されており<sup>24)25)</sup>、また、ゲート電極部分の活性層をほりこむリセス構造<sup>26)27)</sup>が取られる。 $R_g$ を減らすために単位ゲート幅を短くして、フィンガー数を多くする構造や給電点を多くする構造が用いられ<sup>26)28)29)</sup>、T字型ゲート電極構造も提案されている<sup>17)24)</sup>。さらに $n$ の最適化により、 $C_s$ と $R_s$ の最適化が図られている<sup>28)</sup>。一方、 $L$ が短くすることにより、 $C_s$ の減少と $g_m$ の増大を図ることができ、ゲートパターンの形成に電子ビーム露光が用いられる<sup>11)16)</sup>。

## 1 1.3 GaAs FETの製作

### 1 1.3.1 製作工程

図 11.2 に GaAs FET 製作の主な工程を示す。

この工程においてはゲートパターンの形成のみを電子ビーム露光で行っている。

半絶縁性 GaAs 基板上にバッファ層、 $n$ 型活性層を成長させ、エッチングにより  $n$ 型活性層の膜厚を制御する(図 11.2(a))。なお  $n^+$  層つき基板、リセス構造を用いる場合は、この最初のエッチングは行なわない。次にメサエッチングにより素子の分離を行う(図 11.2(b))。ソース・ドレインは  $AuGe/Au$  を蒸着、リフトオフして、 $H_2$  中でアロイして形成し、同時に電子ビーム露光用の合せマークを形成する(図 11.2(c))。

電子ビームレジストを塗布後、 $AuGe/Au$  の合せマークを検出して、電子ビーム露光、現像を行う。リセス構造にする場合は、ここで活性層のエッチングを行う。次に  $Al$  または  $Cr/Pt/Au$  を蒸着、リフトオフしてゲート電極を形成する(図 11.2(d))。その後、絶縁膜の形成、配線を行い、素子が完成する(図 11.2(e))。

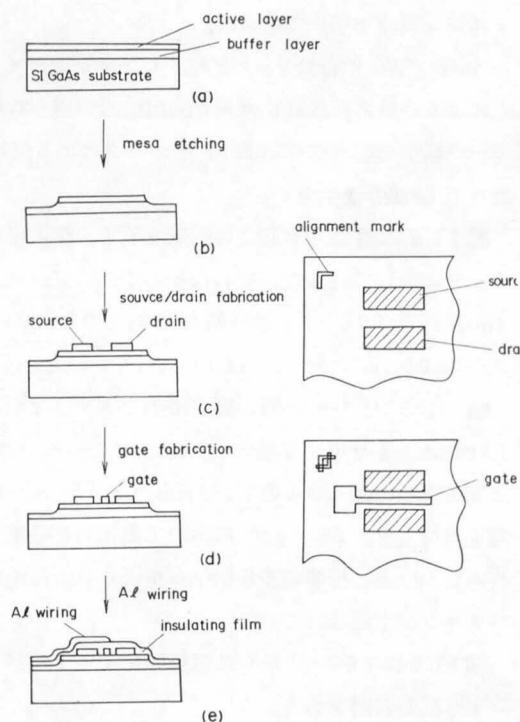


図 11.2 GaAs FETの製作工程

### 1 1.3.2 重ね合せ精度およびパターン精度

GaAs FET の製作においては、細いソース・ドレイン間 ( $3 \sim 4 \mu m$ ) に短いゲートパターン ( $0.5 \mu m$ ) を形成することから、パターン精度、重ね合せ精度が重要な問題となる。ここでは、電子ビーム露光により形成したパターンの重ね合せ精度、パターン精度について述べる。

重ね合せ精度の測定は以下の手順で行った。始めに、基板上に

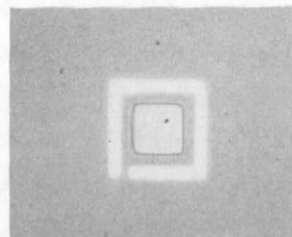


図 11.3 重ね合せ精度測定用マーク

AuGe/Auを用いて、合せマークと図11.3に示す額ぶち状のパターンを形成する。次にレジストを塗布後、合せマークを走査することにより重ね合せを行いながら、電子ビーム露光をして現像後、図11.3に示す正方形のパターンを形成する。正方形パターンと額ぶちパターンの位置ずれは、微少寸法測定器Lampus AI（ニコン製）を用いて行った。

AuGe/Auの合せマークを電子ビームで走査することにより、S/Nの高いマーク検出信号が得られた。マーク検出の信号強度はSi段差マークによる信号と比べて10倍以上大きい。

図11.4に重ね合せ測定の結果を示す。測定は100チップについて行った。重ね合せのずれは $\overline{\Delta x} = 0.01 \mu\text{m}$ 、 $\overline{\Delta y} = 0.16 \mu\text{m}$ 、標準偏差は $\sigma_x = 0.07 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_y = 0.05 \mu\text{m}$ であり、ともに小さい。

図11.5にパターン幅の測定結果を示す。なお、Lampus AIを用いる場合、 $0.5 \mu\text{m}$ パターンについては測定精度が悪くなるので、 $1 \mu\text{m}$ パターンについて測定を行った。58チップについて測定した結果、 $\overline{W} = 0.99 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $0.02 \mu\text{m}$ がえられ、高精度のパターンが実現されている。

図11.6にソース・ドレイン電極間にゲート・パターンを形成した例を示す。

### 11.3.3 リフトオフ

FETのゲート電極の形成は、リセス構造のサイドエッチングを小さくする必要性から一重レジストによるリフトオフを用いた。ゲート金属としてはAlまたはCr/Pt/Auを用いた。

図11.7にゲート金属パターンのSEM写真を示す。

(a)は、試料を自公転させながら蒸着したものであり、(b)は試料の法線上に蒸着源を保持したものである。パターン幅が微細化すると、自公転方式の蒸着法では、金属断面が三角形となり、良好なゲート電極を形成することができない。法線蒸着をすることにより、(b)に示す矩形に近い断面形状をえることができる。

電子ビームレジストとしては、PMMAおよびポジ形ホトレジストであるジアゾレジストを用いた。

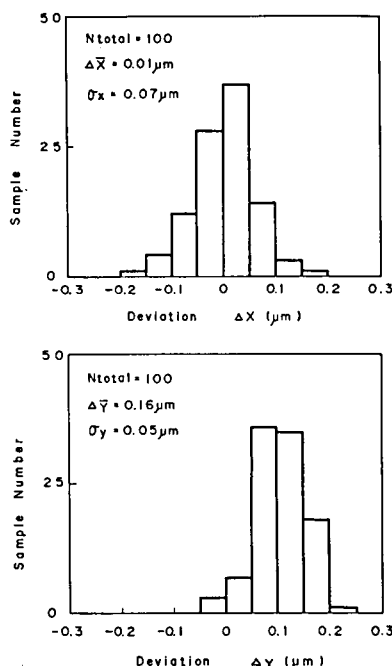


図 11.4 電子ビーム露光における重ね合せ精度

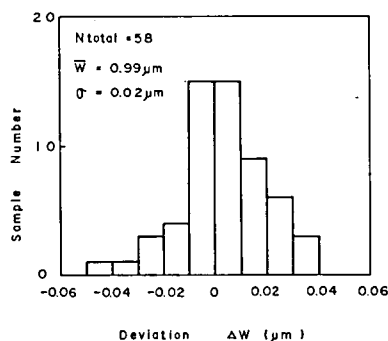


図 11.5 電子ビーム露光におけるパターン精度

PMMAは微細パターンの形成に有利であるが、耐熱性が弱いという欠点を持つ。そのため、Alの蒸着、リフトオフは問題なく行えるが、Cr/Pt/Auの蒸着、リフトオフにおいては、蒸着の際にレジストが変形する場合がある。図11.8にPMMAを用いたリフトオフ工程におけるCr/Pt/Au蒸着後の断面写真を示す。レジストのめくれあがりとそれにともなうゲート長の増大が見られる。この現象を防ぐためには、レジストとして耐熱性のよいジアゾレジストを用いればよい。第5章で述べたように、ジアゾレジストを電子ビーム露光用レジストとして使用することが可能である。ジアゾレジストを用いることによりCr/Pt/Auのリフトオフも容易に行うことができる。

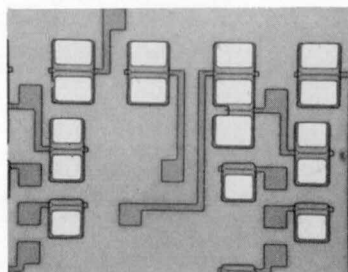
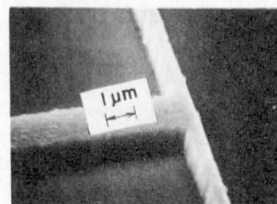


図11.6 ゲートパターンの形成例



(a) 自公転式蒸着



(b) 法線蒸着

図11.7 ゲート金属電極のSEM写真

#### 11.4 GaAs FET の特性

電子ビーム露光を用いて、ゲート長  $0.5\mu\text{m}$ 、ゲート幅  $300\mu\text{m}$  の GaAs FET を製作し、その特性を測定した。

高周波特性の測定はネットワークアナライザ (HP 8409 A システム) を用いて行った。雑音指数 (NF) は、NF 測定器 (AILTECH 75) を用い、図11.9に示すブロック図により測定を行った。

図11.10に最小雑音指数 (NFmin) とそのときの電力利得 (APG) の周波数依存性を示す。12 GHz において、最小雑音指数として 2.0 dB、その時の利得 7.5 dB が得られた。図11.11に単方向利得 (U)、最大利得 (MAG)、最大安定利得 (MSG)、および安定指数 (k) の周波数依存性を示す。U = 0 となる最大発振周波数 ( $f_{\text{max}}$ ) は、80 GHz である。

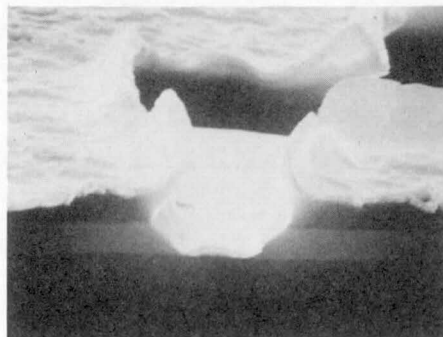


図11.8 PMMAを用いたリフトオフ工程におけるCr/Pt/Au蒸着後の断面SEM写真

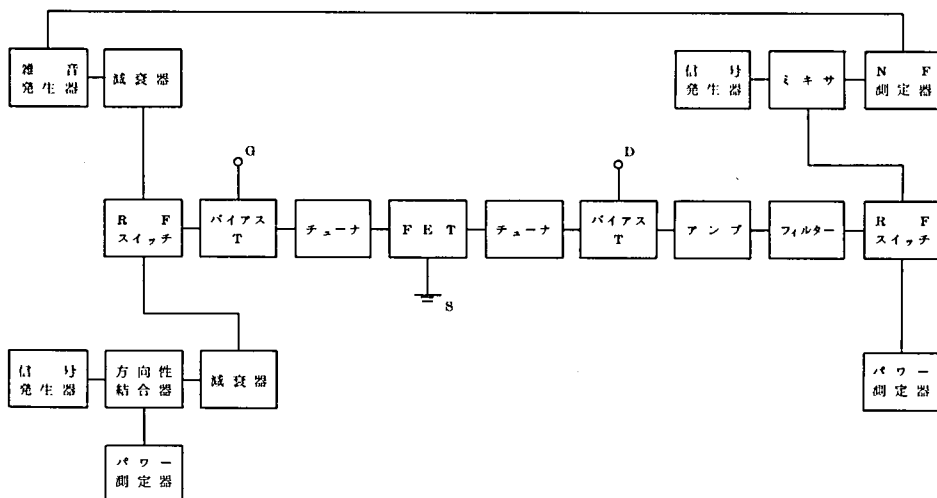


図 11.9 雑音指数測定のプロック図

### 11.5 まとめ

電子ビーム直接露光技術のGaAs FET 製作への応用について述べた。

電子ビーム直接露光を用いて  $0.5\mu\text{m}$  ゲート電極を持つGaAs FET を製作した。ゲート電極の形成にあたっては、電極材料に応じたレジストの選定および法線蒸着が必要なることを示した。パターン幅の標準偏差は  $0.02\mu\text{m}$ 、重ね合せの標準偏差は x 方向  $0.07\mu\text{m}$ 、y 方向  $0.05\mu\text{m}$  でともに高い精度を示した。

高周波特性として  $\text{NFmin} = 2\text{ dB}$ 、 $\text{APG} = 7.5\text{ dB}$  を得た。

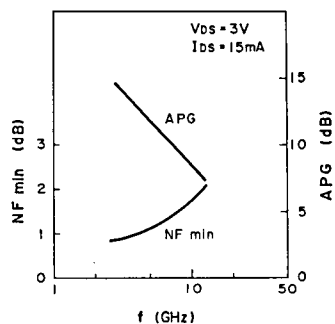


図 11.10 最小雑音指数NFminと利得APGの周波数依存性

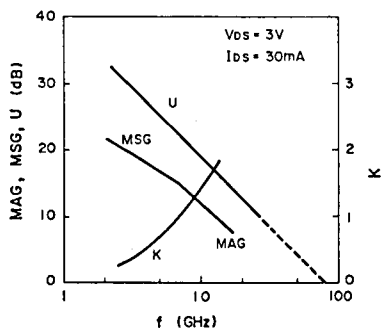


図 10.11 単方向利得U、最大利得MAG、最大安定利得MSG、安定指数kの周波数依存性

## 参 考 文 献

- (1) H-N. Yu, A. Reisman, C.M. Osburn, and D.L. Critchlow, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: Part I - An overview," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.318-324, Apr. 1979.
- (2) R.H. Dennard, F.H. Gaensslen, E.J. Walker, and P.W. Cook, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: Part II - Device design and high-performance logic applications," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.325-333, Apr. 1979.
- (3) P.W. Cook, S.E. Schuster, J.T. Parrish, V. DiLorenzo, and D.R. Freedman, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: Part III - Logic circuit design methodology and applications," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.333-346, Apr. 1979.
- (4) T.H. Ning, P.W. Cook, R.H. Dennard, C.M. Osburn, S.E. Schuster, and H.N. Yu, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: Part IV - Hot-electron design constraints," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.346-353, Apr. 1979.
- (5) W.R. Hunter, L. Ephraïm, W.D. Grobman, C.M. Osburn, B.L. Crowder, A. Cramer, and H.E. Luhn, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: Part V - A single-level polysilicon technology using electron-beam lithography," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.353-359, Apr. 1979.
- (6) W.D. Grobman, H.E. Luhn, T.P. Donohue, A.J. Septh, A. Wilson, M. Hatzakis, and T.H.P. Chang, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: Part VI - Electron-beam lithography," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.360-368, Apr. 1979.
- (7) B.L. Crowder and S. Zirinsky, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: Part VII - Metal Silicide interconnection technology," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.369-371, Apr. 1979.
- (8) J.M. Aitken, "1  $\mu$ m MOSFET VLSI technology: Part VIII - Radiation effects," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.4, pp.372-379, Apr. 1979.
- (9) N. Endo, Y. Kurogi, K. Suzuki, M. Sugimoto, M. Morimoto, Y. Iida, and K. Mori, "Custom LSI process with a micron geometry, partially using electron beam direct writing," Japan J. Appl. Phys., vol.20, supplement 20-1, pp.129-133, 1981.



- (10) Y. Sakakibara, T. Ogawa, K. Komatsu, S. Moniya, M. Kobayashi, and T. Kobayashi, "Electron-beam direct writing technology for 1  $\mu$ m VLSI fabrication," 1980 International Electron Device Meeting Technical Digest, pp.425-428.
- (11) M. Hatzakis, and A.N. Broers, "Electron-beam techniques for fabricating fine metal lines," Record of 11th Symposium on Electron, Ion and Laser Beam Technology, Boulder, CO, 1971; R.F.M. Thomley, Ed., San Francisco Press, pp. 337-344.
- (12) F.S. Ozdemir, G.O. Ladd, D.D. Loper, F.W. Cleary, and N. Hirsch, "Electron microfabrication of GaAs SBFET's," Proc. 7th Int. Conf. on Electron and Ion Beam Sci. and Technol., 1976, pp.411-416.
- (13) R.S. Bultine, R.H. Bennet, D. Parker, A.J. Hughes, and J.A. Turner, "200 nanometer gate length FET's," Proc. 6th Biennial Cornell Electrical Engineering Conference, 1977, pp.143-149.
- (14) T.G. Blocker, H.M. Macksey, and F.H. Doerbeck, "Electron-beam fabrication of submicron gates for GaAs FET's," J. Vac. Sci. Technol., vol.15, no.3, pp.965-968, May/June 1978.
- (15) 戸所義博, 長島 厚, 加納剛太, "電子ビーム直接露光によるサブミクロンゲートの形成," 第39回応用物理学会講演予稿集, 3a-E-4, 1978.
- (16) 戸所義博, 加納剛太, 寺本巖雄, "電子ビーム露光法による GaAs 基板上サブミクロンリフトオフ技術", 第10回理研シンポジウム, PP. 163-166, 1979.
- (17) 戸所義博, 加納剛太, 寺本巖雄, "電子ビーム露光を用いたT字型ゲートの形成", 第40回応用物理学会講演予稿集, 2P-A-4, 1979.
- (18) N. Kato, T. Mizutani, S. Ishida, and M. Ohmori, "Electron-beam fabrication of submicrometer gates for a GaAs MESFET logic," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-27, no.6, pp.1098-1101, June 1980.
- (19) 高木弘光, 嶋野 彰, 戸所義博, 南部修太郎, 加納剛太, "ノーマリオフ型GaAs MESFET を用いた論理集積回路", 昭和54年度電子通信学会総合全国大会, P. 346, 1979.
- (20) T.H.P. Chang, "Scanning electron beam lithography for fabrication of magnetic bubble circuits," IBM J. Res. Develop., vol.20, no.4, pp.376-388, July 1976.

- (21) J.H. Magerlein, D.J. Webb, "Electron-beam Resists for lift-off processing with potential application to Josephson integrated circuits," IBM J. Res. Develop., vol.24, no.5, pp.554-562, Sept. 1980.
- (22) 三露常男, 山崎 攻, 小野周佑, 松浦静也, 和佐清孝, "高周波用 ZnO 薄膜表面波デバイス", National Tech. Rep. vol.25, no.5, pp.1053-1062, Oct. 1979.
- (23) D.B. Ostrowsky, M. Papuchou, A.M. Roy, and J. Trotel, "Fabrication of integrated optical elements using a computer-controlled electron beam," Appl. Optics, vol.13, no.3, pp.636-641, March 1974.
- (24) S. Takahashi, F. Murai, H. Kurono, M. Hirao, and H. Kodera, "A half-micron gate GaAs FET fabricated by chemical dry etching," Japan. J. Appl. Phys., vol.16, Suppl.16-1, pp. 115-118, 1977.
- (25) T. Nozaki and K. Ohata, "Sub-micron gate GaAs MESFET's with ion implanted channels," *ibid*, pp.11-14.
- (26) H. Fukui, "Optimal Noise Figure of Microwave GaAs MESFET's," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.7, pp.1032-1037, July 1979.
- (27) 大畑恵一, 伊藤 仁, 長谷川丈夫, 藤木義矩, "DEEP RECESS 構造低雑音 GaAs MESFET", 電子通信学会技術研究報告, 電子デバイス研究会, vol. ED 79-97, pp. 7-12, 1979.
- (28) 門脇好伸, 鈴木 武, 伊藤道弘, 石井孝, "Ku帯超低雑音 GaAs MESFET", *ibid*, pp. 1-6.
- (29) K. Ohata, T. Nozaki, N. Kawamura, "Improved noise performance of GaAs MESFET's with selectively ion-implanted  $n^+$  source regions," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-24, no.8, pp.1129-1130, Aug. 1977.

## 第 12 章 結 論

本論文では、電子ビーム露光を中心とした微細加工技術について述べた。

はじめに、レジストの電子ビーム露光実験の結果を述べ、次にレジストおよび基板による電子ビームの散乱のシミュレーションと散乱により生ずる近接効果の補正について述べた。プロセス技術としては、リフトオフ技術についてシミュレーション、実験両面より記述を行い、GaAs 結晶のプラズマエッチングについて述べ、さらに酸化膜端の機械的圧力により増速拡散が生じることを明らかにした。最後に、電子ビーム露光を応用したホトマスクおよび GaAs FET の製作について述べた。

本研究により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 電子ビームレジストの露光実験を行い、ポジ形レジスト PMMA、MPR、EBR-9、ネガ形レジスト PGMA、CMS の感度、解像度およびその現像条件への依存性、耐ドライエッチング性を求めた。
- (2) ジアゾ型ホトレジストを電子ビームレジストとして使用する場合にポジ形からネガ形への反転がおき、それが現像条件および基板により変化すること、および段差基板では基板の凹凸により露光量を変える必要があることを示した。
- (3) 電子ビーム露光により形成したレジスト断面形状の基板依存性を調べるため、Si 基板上ならびに GaAs 基板上の PMMA レジストの断面形状について数値計算を行い、実験結果と比較した。数値計算結果と露光実験結果とは、定量的な意味でよく一致した。基板を構成している物質の原子番号が大きい場合には、より小さい場合に比べて、散乱された電子は、電子の入射点周辺に集中し、レジスト中に蓄えられた吸収エネルギーはより大きくなることを示した。GaAs 基板上のレジスト断面形状は Si 基板に比べて、同じ露光量、現像時間では、線幅が太く、膜べりが大きいという結果が得られた。
- (4) シミュレーションにより電子の軌跡を求め、近接効果と加速電圧、レジスト膜厚、基板との関係を定性的に明らかにするとともに、シミュレーションにより求めた、EID 関数を用いて各図形の露光強度を計算することにより、近接効果の補正量を得た。
- (5) 電子ビーム露光によりリフトオフに適したレジスト断面形状が得られることを、数値計算と露光実験により示した。さらに、LO/HI 二重レジスト構造、HI/LO 二重レジスト構造を提案し、この両者について数値計算と露光実験を行った。LO/HI 二重レジスト構造により、露光量の広い範囲にわたってリフトオフに適したアンダーカット形状が得られることを明らかにした。一方、HI/LO 二重レジスト構造により、低容量、低抵抗の T 字型微細ゲート電極を形成できることを示した。また、プラズマエッチングを用いる二重レジスト法を提案し、この方法によれば、光露光においてもアンダーカット形状を形成できることを示した。
- (6)  $\text{CCl}_2\text{F}_2$  ガスを用いて GaAs のプラズマエッチングが可能なことを示し、エッチングは zincblende 型結晶に特有の異方性を示すこと、GaAs に対して選択エッチングが可能であることを明らかにした。
- (7) シリコン基板上に形成された、マスクとなる酸化膜端における機械的圧力のために、増速拡散が起きることを明らかにした。この場合、拡散係数は歪のない定常状態の項と酸化膜によって生じる歪による項との和で表わされることを示した。

(8) 電子ビーム露光とドライエッチングを用いて、高精度のサブミクロンマスクを製作できることを明らかにした。最小線幅として  $0.4\mu\text{m}$  ライン・アンド・スペースが得られた。

(9) 電子ビーム直接露光を用いて、 $0.5\mu\text{m}$  ゲート電極を持つ GaAs FET を製作した。高周波特性として  $\text{NF}_{\text{min}} = 2 \text{ dB}$ 、 $\text{APG} = 7.5 \text{ dB}$  が得られた。

著者発表文献

- (1) 戸所義博, 寺本 巖, “Si アバランシエホトダイオードの増倍率分布”, 電子通信学会技術研究報告, 電子デバイス研究会資料, ED 77-44, 1977.
- (2) Y. Todokoro and I. Teramoto, "The stress-enhanced diffusion of boron in silicon," J. Appl. Phys., vol.49, no.6, pp.3527-3529, 1978.
- (3) 戸所義博, 長島 厚, 加納剛太, “電子ビーム直接露光によるサブミクロンゲートの形成”, 第39回応用物理学学会講演予稿集, 3a-E-4, 1978.
- (4) 戸所義博, 加納剛太, 寺本 巖, “プラズマエッチングを用いた GaAs の選択エッチング”, 第39回応用物理学学会講演予稿集, 4a-E-6, 1978.
- (5) 高木弘光, 嶋野 彰, 戸所義博, 南部修太郎, 加納剛太, “ノーマリオフ GaAs MESFETを用いた論理集積回路”, 昭和54年度電子通信学会総合全国大会, p346, 1979.
- (6) 井上森雄, 大熊 徹, 三井健二, 戸所義博, “プラズマエッチングの半導体プロセスへの応用”, 結晶工学分科会合同研究会資料, pp. 25-33, 1979.
- (7) 戸所義博, 加納剛太, 寺本巖雄, “電子ビーム露光法による GaAs 基板上サブミクロンリフトオフ技術”, 第10回理研シンポジウム, pp. 163-166, 1979.
- (8) 戸所義博, “GaAs基板への電子ビーム露光(数値計算)”, 第40回応用物理学学会講演予稿集, 2p-A-5, 1979.
- (9) 戸所義博, 武田節子, “電子ビーム露光を用いたT字型ゲートの形成”, 第40回応用物理学学会講演予稿集, 2p-A-4, 1979.
- (10) 戸所義博, “光ファイバ通信用受光素子”, National Tech. Rept. vol.25, no.6, pp.1170-1179, Dec. 1979.
- (11) Y. Todokoro, "Double-layer resist films for submicrometer electron-beam lithography," IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-26, no.8, pp.1443-1448, Aug. 1980.
- (12) 戸所義博, 武田節子, 中川正信, “電子ビーム露光とドライエッチングによるサブミクロンマスクの製作”, 第41回応用物理学学会講演予稿集, 19p-E-13, 1980.
- (13) 戸所義博, 武田節子, 河本芳久, “リフトオフ用レジストパターンの形成”, 第42回応用

物理学会講演予稿集, 1p-X-12, 1981.

- (14) 戸所義博, “電子ビーム露光により形成したレジスト断面の基板依存性”, 電子通信学会論文誌, vol. J64-C, No 5, pp. 353-360, May 1981.
- (15) 戸所義博, “プラズマエッチングを用いたリフトオフ用レジストパターンの形式”, 日本学術振興会薄膜第132委員会イオンプラズマプロセッシング小委員会, 第10回研究会資料, pp. 10-13, 1981.
- (16) Y. Todokoro, "Double-layer resist films for optical and electron beam microlithography," Trans. IECE Jap., vol.E65, no.1, pp. 23-27 Jan. 1982.

## 謝

## 辞

この研究をまとめるに当って、京都大学工学部高木俊宜教授のご指導、ご鞭撻を賜りました。厚くお礼申し上げます。

この研究を遂行するに当って、松下電子工業水野常務のご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに深く感謝いたします。

京都大学工学部板谷教授、田丸教授には有益な討議やご教示を賜りました。松下電子工業半導体 R & D センター玉井所長、八重樫部長、沢木主幹技師（現在日本真空工業）、半導体研究所寺本所長、加納部長には終始、暖かい激励と有益な討論、ご教示を賜りました。大阪府立大学工学部村田助教授には数値計算についてご教示頂きました。松下電子工業半導体 R & D センター基礎技術部の皆様、武田技師（現在、退職）および半導体研究所研究部の皆様には有益な討論や実験の面でご協力頂きました。ここに深く感謝いたします。